



HAL
open science

L'intelligence artificielle en réhabilitation orale implantaire

Hillel Aben Danan

► **To cite this version:**

Hillel Aben Danan. L'intelligence artificielle en réhabilitation orale implantaire. Sciences du Vivant [q-bio]. 2024. dumas-04643463

HAL Id: dumas-04643463

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04643463v1>

Submitted on 10 Jul 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License

AVERTISSEMENT

Cette thèse d'exercice est le fruit d'un travail approuvé par le jury de soutenance et réalisé dans le but d'obtenir le diplôme d'État de docteur en chirurgie dentaire. Ce document est mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt toute poursuite pénale.

UNIVERSITÉ PARIS CITÉ

FACULTÉ DE SANTÉ

UFR D'ODONTOLOGIE

Année 2024

N° D021

THÈSE

POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN CHIRURGIE DENTAIRE

Présentée et soutenue publiquement le : 30 janvier 2024

Par

Hillel ABEN DANAN

L'intelligence artificielle en réhabilitation orale implantaire

Dirigée par Mme le Docteur Hélène Citterio

JURY

Mme le Professeur Géraldine Lescaille

Président

Mme le Docteur Hélène Citterio

Assesseur

M. le Docteur Philippe François

Assesseur

Mme le Docteur Oriane Borel

Assesseur



L'auteur s'engage à respecter les droits des tiers, et notamment les droits de propriété intellectuelle. Dans l'hypothèse où la thèse d'exercice comporterait des éléments protégés par un droit quelconque, l'auteur doit solliciter les autorisations nécessaires à leur utilisation, leur reproduction et leur représentation, auprès du ou des titulaires des droits. Le droit de citations doit s'exercer avec rigueur et discernement. Certaines citations peuvent comporter un extrait textuel de la source. Cet extrait textuel doit être relativement court (une quinzaine de lignes tout au plus), mis entre guillemets ou clairement séparé du corps du texte et bien évidemment référencé en citation. En ce qui concerne la citation sans extrait textuel (mention d'idées ou concepts originaux, données chiffrées, figures, etc.), il faut également en citer la source. Toute figure, tableau, graphique reproduit doit également être accompagné de la citation de la source. L'auteur est responsable du contenu de sa thèse d'exercice. Il garantit l'Université contre tout recours. Elle ne pourra en aucun cas être tenue responsable de l'atteinte aux droits d'un tiers.

Hillel ABEN DANAN

Tableau des enseignants de l'UFR d'Odontologie

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MAÎTRES DE CONFÉRENCES
1. DÉVELOPPEMENT, CROISSANCE ET PRÉVENTION	ODONTOLOGIE PÉDIATRIQUE	Mme M. Molla-AUJAY DE LA DURE Mme É. DURSUN Mme S. VITAL	M. P.-J. BERAT (MCU associé) Mme A.-L. BONNET M. F. COURSON Mme A. VANDERZWALM
	ORTHOPÉDIE DENTO-FACIALE	Mme E. LE NORCY	M. G. DOT M. C. DUNGLAS M. P. GARREC Mme A. KAMOUN Mme B. VI-FANE
	PRÉVENTION, ÉPIDÉMIOLOGIE, ÉCONOMIE DE LA SANTÉ ET ODONTOLOGIE LÉGALE	Mme S. AZOGUI-LEVY M. P. PIRNAY	Mme A. GERMA Mme V. SMAIL-FAUGERON Mme A. TENENBAUM
2. CHIRURGIE ORALE, PARODONTOLOGIE, BIOLOGIE ORALE	PARODONTOLOGIE	Mme F. ANAGNOSTOU M. M. BIOSSE DUPLAN Mme M. C. CARRA Mme M.-L. COLOMBIER Mme M. GOSSET	M. A. BRUN M. D. GUEZ M. S. KERNER
	CHIRURGIE ORALE	Mme G. LESCAILLE M. L. MAMAN Mme L. RADOŇ M. N. MOREAU	Mme V. BAAROUN M. B. COURRIER Mme A.-L. EJEIL M. F. FERRÉ M. F. GAULTIER M. T. NGUYEN Mme J. ROCHEFORT M. L. SICARD Mme I. TAÏHI M. H. TARRAGANO
	BIOLOGIE ORALE	Mme C. BARDET (PU) Mme A. BERDAL Mme C. CHAUSSAIN M. V. DESCROIX M. B. FOURNIER M. B. GOGLY Mme S. SÉGUIER	Mme C. ANDRIQUE (MCU associée) M. C.-D. ARRETO M. J. BOUCHET (MCF) Mme H. CHARDIN M. P. COLLIN Mme M.-H. COTTET Mme A. COUDERT (MCF) Mme C. GORIN Mme S. HOUARI-MEJRI Mme J. ISAAC (MCF) M. O. LE MAY M. G. LIGNON (MCU associé) M. A. NASSIF Mme N. NOWWAROTE (MCU associé) M. B. PAIVA DOS SANTOS (MCF)
3. RÉHABILITATION ORALE (DÉBUT)	DENTISTERIE RESTAURATRICE ENDODONTIE	Mme T. BOUKPESSI M. P. COLON Mme C. GAUCHER	Mme F. BERÈS Mme C. BESNAULT Mme A.-M. COLLIGNON M. F. DECUP Mme A. HARTMANN Mme K. JEDEON M. G. KUHN Mme C. MESGOUÉZ-MENEZ Mme C. MOCQUOT Mme N. PRADELLE PLASSE Mme M. ZANINI

DÉPARTEMENTS	DISCIPLINES	PROFESSEURS DES UNIVERSITÉS	MAÎTRES DE CONFÉRENCES
3. RÉHABILITATION ORALE (SUITE)	PROTHÈSES	Mme M.-V. BERTERETCHE Mme A. BRAUD M. O. FROMENTIN M. C. RIGNON-BRET M. B. TAVERNIER Mme C. WULFMAN	M. J.-M. CHEYLAN Mme H. CITTERIO Mme M.-J. CRENN M. M. DAAS M. D. DOT M. L. DUPAGNE (MCU associé) M. N. EID M. S. ESCURE Mme I. FOUILLOUX Mme L. FRIEDLANDER M. P. GATEAU M. D. MAURICE M. P. MOULIN M. P. RENAULT Mme É. SARFATI M. J.-E. SOFFER M. P. TRAMBA
	FONCTION-DYSFONCTION, IMAGERIE, BIOMATÉRIAUX	M. Y. BOUCHER Mme L. JORDAN M. J.-F. N'GUYEN M. B. SALMON	M. J.-P. ATTAL M. C. AZEVEDO Mme R. BENBELAÏD Mme A. BENOÎT A LA GUILLAUME (MCF) Mme J. BOSCO M. D. BOUTER M. M. CHERRUAU M. R. FELIZARDO M. P. FRANÇOIS Mme F. MANGIONE M. A. PORPORATI (MCU associé) Mme F. TILOTTA
PROFESSEURS ÉMÉRITES		M. P. BOUCHARD Mme M.-L. BOY-LEFÈVRE Mme M. FOLLIGUET Mme M. WOLIKOW M. R. GARCIA M. J.-J. LASFARGUES M. A. LAUTROU M. G. LEVY	M. B. PELLAT Mme A. POLIARD M. J.-L. SAFFAR

Liste mise à jour le 08 décembre 2023

Remerciements

À Mme le Professeur Géraldine Lescaille ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Docteur de l'Université Paris Diderot ; Habilitée à Diriger des Recherches ; Professeur des Universités, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris ; Vice-Doyenne de l'UFR d'Odontologie - Université Paris Cité ; Chef de service de l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière

Pour l'honneur que vous me faites en acceptant de présider le jury de cette thèse d'exercice, veuillez trouver ici l'expression de mon profond respect et de ma gratitude.

À Mme le Docteur Hélène Citterio ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris

Je tiens à vous exprimer ma sincère gratitude pour votre dévouement et votre précieuse aide tout au long de ma thèse. Votre expertise et votre disponibilité ont été inestimables. Je vous prie de bien vouloir trouver ici le témoignage de ma profonde considération et de mes remerciements les plus sincères.

À M. le Docteur Philippe François ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Docteur de l'Université Paris 13 ; Maître de Conférences des Universités, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité ; Praticien Hospitalier, Assistance Publique-Hôpitaux de Paris

Pour l'honneur que vous me faites en siégeant à ce jury, veuillez trouver dans cette thèse l'expression de mon respect et de mes remerciements les plus sincères.

À Mme le Docteur Oriane Borel ; Docteur en Chirurgie dentaire ; Chef de Clinique des Universités - Assistant des Hôpitaux, UFR d'Odontologie - Université Paris Cité

Pour l'honneur que vous me faites en siégeant à ce jury, veuillez trouver dans cette thèse l'expression de mon estime et de mes remerciements les plus sincères.

Résumé et indexation en français et anglais

Résumé :

L'Intelligence Artificielle (IA) a connu un développement spectaculaire au cours des dernières décennies, et son influence s'étend désormais à divers domaines, y compris la médecine et plus spécifiquement, l'implantologie. L'histoire de l'IA en implantologie remonte aux premiers systèmes d'aide à la décision clinique dans les années 1980. Depuis lors, l'IA a évolué grâce à l'essor des techniques d'apprentissage automatique et de l'apprentissage profond. Les potentialités de l'IA en implantologie sont vastes. Elle offre des possibilités dans le dépistage des patients à risque, l'aide à la décision thérapeutique, l'évaluation du pronostic implantaire, l'aide à la planification, l'optimisation du design implantaire, des procédés de fabrication et des biomatériaux, la chirurgie guidée et la réhabilitation prothétique. Cependant, l'adoption croissante de l'IA en implantologie soulève également des préoccupations. Les risques incluent la sécurité des données médicales, la responsabilité légale en cas d'incident, les conflits d'intérêts et les impacts potentiels sur l'accès aux soins, la relation praticien-patient et l'avenir de la profession. Néanmoins, de nombreuses améliorations seront encore nécessaires afin de rendre la technologie fiable et l'intégrer à la pratique quotidienne. L'IA ne doit pour le moment pas être vue comme une menace pour la profession mais comme un outil visant à assister le dentiste dans son travail.

Discipline ou spécialité :

Prothèses dentaires

Mots clés français (fMeSH et Rameau) :

fMeSH : Apprentissage machine ; Chirurgie assistée par ordinateur

Rameau : Intelligence artificielle en médecine ; Implants dentaires

Forme ou Genre :

fMeSH : Dissertation universitaire

Rameau : Thèses et écrits académiques

Title : Artificial intelligence in implant oral rehabilitation

Abstract :

Artificial Intelligence (AI) has undergone a spectacular development in recent decades, and its influence now extends to various fields, including medicine, and more specifically, implantology. The history of AI in implantology dates to the early clinical decision support systems in the 1980s. Since then, AI has evolved with the rise of machine learning and deep learning techniques. The potential applications of AI in implantology are vast. It offers possibilities in screening high-risk patients, assisting in therapeutic decision-making, assessing implant prognosis, aiding in planning, optimizing implant design, manufacturing processes, and biomaterials, guided surgery, and prosthetic rehabilitation. However, the increasing adoption of AI in implantology also raises concerns. Risks include the security of medical data, legal liability in case of incidents, conflicts of interest, and potential impacts on access to care, the practitioner-patient relationship, and the future of the profession. Nevertheless, many improvements will still be necessary to make the technology reliable and integrate it into daily practice. AI should not be seen as a threat to the profession at this time but as a tool designed to assist dentists in their work.

Branch or specialty :

Dental Prosthesis

English keywords (MeSH) :

Machine Learning ; Surgery, Computer-Assisted

Publication type (MeSH) :

Academic Dissertation

Liste des abréviations

- ANN : Artificial Neural Network
- CBCT : Cone Beam Computed Tomography
- CNC : Computer Numerical Control
- CNN : Convolutional Neural Networks
- CDBIO : Comité directeur pour les droits humains dans les domaines de la biomédecine et de la santé
- DP : Deep Learning
- EEG : Electroencéphalogramme
- ECG : Electrocardiogramme
- FDA : Food and Drug Administration
- GP : Gutta percha
- IA : Intelligence artificielle
- ML : Machine Learning
- MSR : Méthode des surfaces de réponse
- MP : Maladie parodontale
- NLP : Natural Language Processing
- QI : Quotient intellectuel
- RGPD : Règlement général sur la protection des données
- SLM : Selective Laser Melting

Table des matières

INTRODUCTION3

1 : QU'EST-CE QU'UNE INTELLIGENCE ARTIFICIELLE ?4

1.1 DEFINITIONS4

1.1.1 L'intelligence4

1.1.2 L'intelligence humaine4

1.1.3 L'intelligence artificielle6

1.2 L'HISTOIRE DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE7

1.3 LES DIFFERENTS TYPES ET BRANCHES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE9

1.3.1 Les 3 grands types d'IA9

1.3.2 Les différentes branches de l'intelligence artificielle10

1.4 EXEMPLES D'APPLICATIONS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LE DOMAINE MEDICAL17

1.4.1 Cardiologie17

1.4.2 Radiologie18

1.4.3 Cancérologie19

1.4.4 Neurologie20

1.4.5 Industrie pharmaceutique20

2 : LE POTENTIEL DE L'IA EN REHABILITATION ORALE IMPLANTAIRE : DU PROJET A LA REHABILITATION

PROTHETIQUE22

2.1 DEPISTAGE, DIAGNOSTIC ET FACTEURS DE RISQUE22

2.1.1 Un mot sur l'IA en prévention bucco-dentaire22

2.1.2 Dépistage et patients à risque23

2.1.3 Aide au diagnostic pré-implantaire27

2.2 ETABLISSEMENT DU PROJET PROTHETIQUE ET DE SES ALTERNATIVES30

2.2.1 Analyse pré-implantaire et objectifs30

2.2.2 Apport de l'IA dans la décision thérapeutique31

2.3 AIDE A LA PANIFICATION IMPLANTAIRE33

2.3.1 Objectifs33

2.3.2 Apport de l'IA34

2.4 CONCEPTION, FABRICATION ET AMELIORATION DES TECHNOLOGIES IMPLANTAIRES38

2.4.1 Design, technologies et matériaux actuellement utilisés38

2.4.2 Optimisation du design implantaire39

2.4.3 Amélioration des procédés de fabrication41

2.4.4	<i>L'IA dans l'étude des biomatériaux</i>	44
2.5	PHASE CHIRURGICALE ET GUIDAGE	47
2.5.1	<i>Techniques actuelles en chirurgie implantaire guidée</i>	47
2.5.2	<i>IA et chirurgie guidée : Le robot YOMI</i>	48
2.5.3	<i>Vers une chirurgie complètement autonome ?</i>	50
2.6	REALISATION PROTHETIQUE ET MAINTENANCE	52
2.6.1	<i>Identification du système implantaire</i>	52
2.6.2	<i>Conception prothétique</i>	53
2.6.3	<i>Suivi et maintenance</i>	55
2.7	QUE DOIT-ON REELLEMENT EN ATTENDRE ?	56
3	FAUT-IL EN AVOIR PEUR ?	59
3.1	REFLEXIONS SUR LES ENJEUX ETHIQUES ET JURIDIQUES	59
3.1.1	<i>Protection et utilisation des données</i>	59
3.1.2	<i>Le problème de la responsabilité</i>	60
3.1.3	<i>Recherche et conflits d'intérêts</i>	61
3.2	IMPACTS SOCIAUX ET ECONOMIQUES	62
3.2.1	<i>Inégalité d'accès à des soins de qualité</i>	62
3.2.2	<i>Évolution de la relation praticien-patient</i>	62
3.2.3	<i>Conséquences économiques</i>	63
3.3	L'AVENIR DE LA PROFESSION : NOUVEAUX METIERS, MUTATIONS, DISPARITIONS ?	64
3.3.1	<i>Évolution dans la profession de dentiste et nouvelles spécialités</i>	64
3.3.2	<i>Impact sur le métier de prothésiste</i>	65
	CONCLUSION	67
	BIBLIOGRAPHIE	68
	TABLE DES FIGURES	72
	TABLE DES TABLEAUX	73

Introduction

Les débuts de l'intelligence artificielle (IA) datent des années 1950 durant lesquelles les scientifiques évoquent l'idée d'un cerveau artificiel créant ainsi la discipline de l'IA. Cette technologie a été popularisée auprès du grand public dans les années 1990 avec Deep Blue, premier système informatique à battre le champion du monde d'échec Garry Kasparov. Ces dernières années, l'intelligence artificielle a connu une véritable révolution avec un impact sur de nombreux métiers et cela notamment grâce à ses capacités d'apprentissage et d'analyse de quantités phénoménales de données en un temps très court lui permettant ainsi de commencer à rivaliser avec l'intelligence humaine dans certaines tâches voire, de plus en plus souvent, à la surpasser.

Ainsi, les applications de l'IA dans le monde de la santé ont véritablement explosé, que ce soit pour l'amélioration de la prévention, du diagnostic, du traitement et du suivi des patients. Ces innovations ont déjà apporté de nombreux résultats dans chaque domaine. Alors qu'il ne s'agit que des prémices des usages de l'IA, des perspectives immenses s'ouvrent devant nous. Cette évolution fulgurante s'accompagne de nombreuses craintes fondées notamment sur la question de l'éthique et du devenir des professions médicales.

La dentisterie ne faisant pas exception, l'IA s'est considérablement développée dans le domaine avec de multiples applications notamment en réhabilitation implantaire. L'implantologie est une discipline chirurgicale complexe qui nécessite une planification précise et une expertise clinique. L'IA trouve son intérêt pour répondre à ces exigences et améliorer l'efficacité des procédures en proposant une prise en charge toujours plus personnalisée.

Notre travail vise à explorer ce que l'on peut attendre de l'intelligence artificielle en réhabilitation orale implantaire, les bénéfices qu'on peut espérer et les interrogations qui se posent. La première partie définit le concept d'intelligence artificielle et les différentes notions et formes qu'elle présente. La seconde partie développe les applications possibles de l'IA en réhabilitation implantaire au cours des différentes phases. Enfin, dans la troisième partie présente les interrogations et les réticences que l'IA a fait apparaître concernant notamment l'éthique médicale, les impacts sociaux et économiques ainsi que sur le devenir de la profession de chirurgien-dentiste et de prothésiste.

1 : Qu'est-ce qu'une intelligence artificielle ?

1.1 Définitions

1.1.1 L'intelligence

Le terme intelligence tire son étymologie du latin *intelligentia*, lui-même issu du mot *intellego* qui signifie « action de discerner, de comprendre » avec le préfixe *inter* (« entre ») et le radical *lego* (« cueillir, choisir ») donnant ainsi le sens étymologique « choisir entre, sélectionner ».

On peut tenter de définir l'intelligence comme la capacité d'apprendre et d'appliquer des techniques appropriées pour résoudre des problèmes et atteindre des objectifs, de façon adaptée au contexte et à l'environnement. Selon les Définitions de Platon, l'intelligence est définie comme « l'activité qui permet d'acquérir la science ».

La définition de l'intelligence est ainsi une question qui intéresse l'homme depuis la nuit des temps mais qui reste cependant très vaste et de nombreux ouvrages y sont dédiés sans toutefois clore le débat. Beaucoup s'accordent à dire qu'il n'y a cependant pas un mais plusieurs types d'intelligence.

1.1.2 L'intelligence humaine

Avant de parler d'une intelligence « artificielle », il faut évidemment dire ce qu'est une intelligence « non-artificielle ». Ce concept d'intelligence peut se définir à la fois de façon quantitative et qualitative.

La psychologue Linda Gottfredson donne une définition qualitative de l'intelligence comme la « capacité mentale qui implique l'habileté à raisonner, planifier, résoudre des problèmes, penser de façon abstraite, comprendre des idées complexes, apprendre rapidement et apprendre de l'expérience ». Selon elle, ce n'est pas simplement une question de connaissance mais « cela reflète plutôt une capacité plus large et plus profonde à comprendre notre environnement » (1).

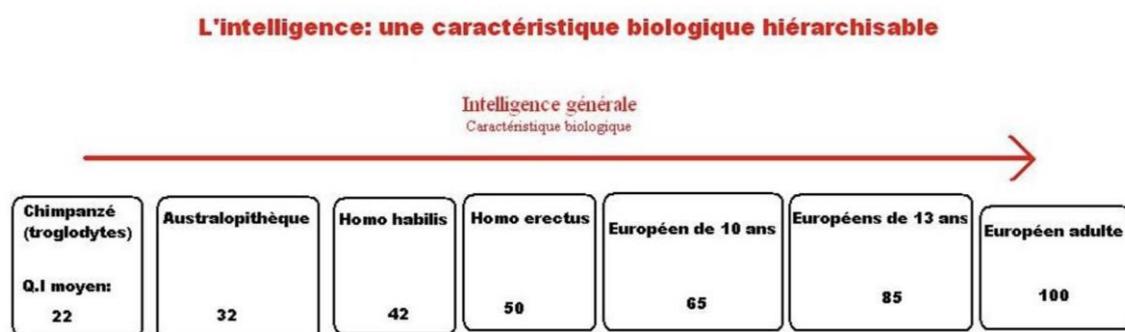
Pour définir l'intelligence de façon quantitative, il faut ainsi considérer que celle-ci est une caractéristique biologique hiérarchisable en mettant l'intelligence humaine en continuum avec l'intelligence animale et en partant du principe que nous sommes des animaux.

Le quotient intellectuel (QI) est une mesure utilisée pour évaluer l'intelligence générale d'une personne. Il a été développé par le psychologue français Alfred Binet au début du 20e siècle et est devenu l'un des outils les plus couramment utilisés pour évaluer les capacités cognitives. Le calcul du QI repose généralement sur des tests standardisés, tels que le test de Wechsler pour enfants et pour adultes et est réalisé par des psychologues spécialisés. Ces tests sont conçus pour évaluer différentes capacités cognitives, telles que la mémoire, le raisonnement logique, la compréhension verbale, la résolution de problèmes et la vitesse de traitement des informations.

Il est important de noter que le QI est une mesure de l'intelligence générale et ne représente pas l'ensemble des capacités intellectuelles d'une personne. Il ne prend pas en compte d'autres aspects importants tels que la créativité, l'intelligence émotionnelle ou les compétences pratiques. De plus, le QI est influencé par divers facteurs, tels que l'éducation, l'environnement socio-économique et les facteurs génétiques.

L'intelligence ou l'efficacité du système nerveux central est ainsi plus importante chez l'adulte (Q.I moyen de 100) que l'enfant de 10 ans (70 de Q.I), elle-même plus importante que celle des grands singes (2).

Figure 1 : Hiérarchie des intelligences selon le QI



Source : Hansen, « Différences raciales dans l'intelligence », 2018.

L'intelligence humaine ne se limite cependant pas seulement à une seule forme. La théorie des intelligences multiples, proposée par Howard Gardner en 1983 dans le livre *Frames of MIND : the Theory of Multiple Intelligence* suggère qu'il existe plusieurs types d'intelligence chez l'humain. On en dénombre ainsi principalement 8 types (3) :

- **L'intelligence verbale / linguistique** est la capacité à être sensible aux structures linguistiques sous toutes ses formes et à utiliser le langage pour comprendre les autres et exprimer ce que l'on pense.
- **L'intelligence logicomathématique** est la capacité de logique, d'analyse, d'observation et de résolution des problèmes.
- **L'intelligence intrapersonnelle** est l'aptitude à faire de l'introspection, à identifier ses sentiments et à analyser ses pensées, ses comportements et ses émotions.
- **L'intelligence interpersonnelle / sociale** permet à l'individu d'agir et de réagir avec les autres, de les comprendre et de communiquer avec eux.
- **L'intelligence visuo-spatiale** donne la possibilité à l'individu de se faire une représentation spatiale du monde dans son esprit et de créer une image mentale.
- **L'intelligence kinesthésique** est la capacité d'utiliser son corps ou une partie de son corps pour communiquer ou s'exprimer dans la vie quotidienne ou dans un contexte artistique, pour réaliser des tâches faisant appel à la motricité fine, pour apprendre en manipulant des objets.
- **L'intelligence musicale** sert à penser en rythme et en mélodie, à reconnaître des modèles musicaux, à les mémoriser, à les interpréter, à en créer, et à être sensible à la musicalité des mots
- **L'intelligence naturaliste** (ajoutée en 1993) est l'intelligence qui permet d'être sensible à ce qui est vivant ou de comprendre l'environnement dans lequel l'homme évolue. C'est la capacité d'apprécier, de reconnaître et de classer la faune, la flore et le monde minéral.

1.1.3 L'intelligence artificielle

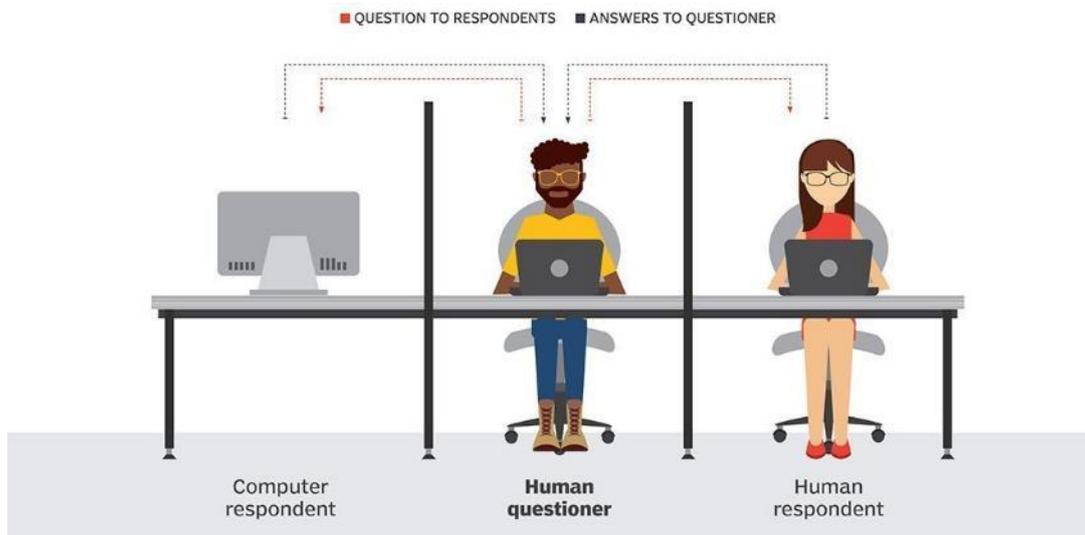
Le terme d'intelligence artificielle, souvent abrégé IA, peut être attribué au Pr John McCarthy en 1955, principal pionnier dans le domaine et qui la définit comme « la science et l'ingénierie de la conception de machines intelligentes ». Il explique ainsi que « celle-ci est liée à la tâche similaire qui consiste à utiliser des ordinateurs pour comprendre l'intelligence humaine, mais l'IA ne doit pas se limiter aux méthodes qui sont biologiquement observables » (48).

On note ainsi qu'il n'existe pour le moment pas de définition solide de l'intelligence artificielle qui ne dépend pas d'une mise en relation avec l'intelligence humaine. Le problème est qu'il est encore difficile de caractériser les types de procédures que nous voulons appeler intelligentes.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer si un ordinateur est « intelligent », la première et la plus célèbre reste le Test de Turing proposé par Alan Turing en 1950. Celui-ci consiste à faire converser un humain à l'aveugle avec un ordinateur et un autre humain. Le test est considéré comme réussi si

l'humain n'est pas capable de dire lequel de son interlocuteur est l'humain et lequel est la machine. Cette méthode présente évidemment des inconvénients et reste très contestée car elle ne se limite qu'à une intelligence humaine et non « pure », c'est à dire dépourvue d'émotions et raisonnant de façon objective et impartiale. (4)

Figure 2 : Le test de Turing



Source : Techtarget, « Turing test », 2020.

Arthur R. Jensen, psychologue reconnu pour ses recherches sur l'intelligence humaine, suggère ainsi que tous les humains possèdent les mêmes mécanismes intellectuels et que les différences observées seraient liées à des facteurs biochimiques et physiologiques comme la vitesse, la mémoire à court terme ou la capacité à former des souvenirs précis et récupérables à long terme (5). Cette réflexion ne fait pas l'unanimité mais quoi qu'il en soit la situation de l'IA de nos jours est à l'exact opposé. En effet, de nos jours, les programmes informatiques ont à leur disposition une très grande vitesse et beaucoup de mémoire mais leurs capacités correspondent aux mécanismes intellectuels que les concepteurs comprennent eux même assez bien.

1.2 L'histoire de l'intelligence artificielle

Le concept d'utiliser des ordinateurs pour simuler un comportement intelligent et un esprit critique a été décrit pour la première fois en 1950 par Alan Turing dans son livre « computing machinery and intelligence ».

C'est donc à partir des années 1950 que l'IA va connaître une évolution importante avec l'apparition de nombreuses innovations dans le domaine. Cette évolution sera cependant marquée par des périodes plus difficiles avec de vrais ralentissements dans la recherche du notamment à un gel des financements et une perte d'intérêt dans le domaine : on appelle ces périodes les hivers de l'IA ou AI winters.

Voici donc une chronologie des grands événements qui ont marqué l'histoire de l'IA (6) :

1956 : Le terme « intelligence artificielle » est utilisé par John McCarthy lors de la conférence de Dartmouth. Pour la première fois, l'IA devient une science académique.

1957 : Invention du Perceptron, un réseau de neurones artificiels, par Frank Rosenblatt. Il s'agit d'un algorithme de classification binaire qui utilise une fonction de seuil pour séparer des données en deux classes distinctes.

1964 : ELIZA, programme informatique jouant le rôle d'un psychiatre dont l'utilisateur n'est autre que le patient. Il était capable de communiquer en utilisant des méthodes de substitution et de reconnaissances de forme lui permettant d'imiter une conversation humaine, constituant ainsi le premier chatbot de l'histoire.

1966 : Shakey, premier « individu électronique » est développé par l'institut de recherche de Stanford. Il est ainsi capable d'interpréter ses instructions et de raisonner sur ses actions et pas simplement de suivre des commandes une à une. Nommé au *Robot Hall of Fame* en 2004, il constitue une avancée majeure dans le domaine.

1973 : Développement du premier robot à marche bipède, Wabot-1, conçu par l'université de Waseda au Japon.

1974 - 1980 : C'est le grand hiver de l'IA. Celui-ci fait notamment suite à l'intervention du mathématicien anglais Sir James Lighthill sur la BBC, dont les critiques sur l'IA et le rapport rédigé quelques mois plus tôt entraîneront un gel de nombreux financements sur l'IA, considéré alors comme un domaine essoufflé en manque d'avancées concrètes.

1980-1987 : L'intérêt pour l'IA renaît et connaît alors un boom, notamment par la montée des systèmes experts, programmes utilisant des connaissances spécialisées pour effectuer des tâches d'expertise dans un domaine particulier en exploitant une base de connaissances contenant des informations et des règles pertinentes dans un domaine spécifique.

1987-1993 : C'est le deuxième hiver de l'IA, marquant un nouvel arrêt des financements par la DARPA, du aux coûts de développement importants et à l'effondrement du marché du matériel informatique.

1997 : L'ordinateur Deep Blue d'IBM bats le champion du monde d'échecs Gary Kasparov.

2006 : l'IA entre dans le monde des entreprises, avec des compagnies comme Twitter, Facebook, Google qui commence à l'utiliser.

2011 : Le programme informatique d'IBM « Watson » gagne au quiz télévisé Jeopardy en répondant à des questions complexes énoncées par un humain.

2016 : AlphaGo, de la société DeepMind, bats Lee Sedol, l'un des meilleurs joueurs mondiaux, au jeu de go qui constitué encore un véritable défi pour l'a du fait de sa complexité. Cet algorithme utilise des techniques d'auto-apprentissage, en simulant des parties contre lui-même et en s'entraînant contre d'autres humains.

2022 : ChatGPT, un chatbot développé par OpenIA et ouvert au public, entraine un véritable séisme du fait de ses capacités impressionnantes à répondre à des requêtes de l'utilisateur dans des domaines très variés.

1.3 Les différents types et branches de l'intelligence artificielle

1.3.1 Les 3 grands types d'IA

De façon générale, il est possible de classer une IA, qu'elle soit réelle ou hypothétique, parmi 3 grands types en fonction de ses capacités à imiter les caractéristiques humaines, de la technologie qu'elle utilise et de ses applications :

- 1) L'IA étroite (ou faible) : elle fait référence à une intelligence artificielle spécialisée dans une tâche ou un domaine spécifique. Elle est conçue pour exécuter des tâches spécifiques, telles que la reconnaissance vocale, la reconnaissance d'images ou la prédiction de tendances, mais elle ne peut pas s'adapter facilement à de nouveaux domaines ou de nouvelles tâches.
- 2) L'IA générale (ou forte) : elle correspond L'IA étroite (ou faible) : elle fait référence à une intelligence artificielle spécialisée dans une tâche ou un domaine spécifique. Elle est conçue pour exécuter des tâches spécifiques, telles que la reconnaissance vocale, la reconnaissance d'images ou la prédiction de tendances, mais elle ne peut pas s'adapter facilement à de nouveaux domaines ou de nouvelles tâches.
- 3) La superintelligence artificielle : c'est une intelligence artificielle hypothétique qui serait capable de surpasser largement l'intelligence humaine dans tous les domaines. Elle serait capable de résoudre des problèmes que les êtres humains ne peuvent pas résoudre, et pourrait même améliorer ses propres capacités de manière autonome.

Il est important de noter que la superintelligence est encore un concept hypothétique non encore atteint. Les recherches en IA se concentrent actuellement sur le développement d'IA étroites et générales, avec des applications pratiques dans différents domaines.

1.3.2 Les différentes branches de l'intelligence artificielle

Comme on le voit de nos jours, l'IA présente de nombreuses applications possibles dans de nombreux domaines qui demandent des compétences très précises et variées. Cela a été rendu possible par le développement de plusieurs sous-catégories au sein même de l'IA permettant de répondre à des besoins spécifiques. Il existe de nombreuses branches de l'IA qui ont toutes leur importance et leur utilité dans différents domaines. On citera ici les plus courantes et les plus largement utilisées :

1.3.2.1 L'apprentissage automatique (Machine Learning) :

Le Machine Learning (ML) est une méthode d'analyse de données qui permet aux ordinateurs d'apprendre à résoudre des problèmes sans être explicitement programmés pour cela. En d'autres termes, au lieu de programmer une série d'instructions spécifiques pour effectuer une tâche donnée, le ML permet à l'ordinateur d'apprendre à partir de données et de prendre des décisions en se basant sur des modèles identifiés dans ces données.

Par exemple, si l'on souhaite développer un système capable de prédire le temps qu'il fera demain, plutôt que de programmer manuellement les règles qui permettent de faire cette prédiction, on peut entraîner un modèle de ML à partir de données historiques sur les conditions météorologiques passées. Le système deviendra capable de faire des prédictions en se basant sur ces données.

Il existe plusieurs types d'apprentissage :

1. « Supervisé » : C'est le plus couramment utilisé. Dans ce type d'apprentissage, le modèle est entraîné sur un ensemble de données étiquetées, c'est-à-dire que chaque donnée est associée à une étiquette ou une réponse connue. Le modèle apprend à prédire les étiquettes correctes pour de nouvelles données en ajustant ses paramètres à partir des données d'entraînement. Par exemple, nous pouvons entraîner un modèle à prédire si une image montre un chat ou un chien.
2. « Non supervisé » : il est utilisé lorsque nous n'avons pas d'étiquettes pour nos données. Le modèle apprend à trouver des structures dans les données en regroupant des données similaires

ou en réduisant leur nombre. Par exemple, nous pouvons entraîner un modèle à trouver des groupes de clients similaires à partir des données de vente d'une entreprise.

3. « Par renforcement » : il est utilisé lorsque nous voulons entraîner un modèle à prendre des décisions dans un environnement donné. Le modèle apprend à maximiser une récompense en prenant des actions dans cet environnement. Par exemple, nous pouvons entraîner un modèle à jouer à un jeu vidéo en lui apprenant à maximiser son score.

En résumé, le ML permet aux ordinateurs d'apprendre à partir de données, de trouver des modèles et des relations cachées dans ces données, et d'utiliser ces connaissances pour prendre des décisions ou effectuer des tâches. Chaque type d'apprentissage est ainsi utilisé pour des types de problèmes différents et nous choisissons celui qui convient le mieux au problème que nous essayons de résoudre.

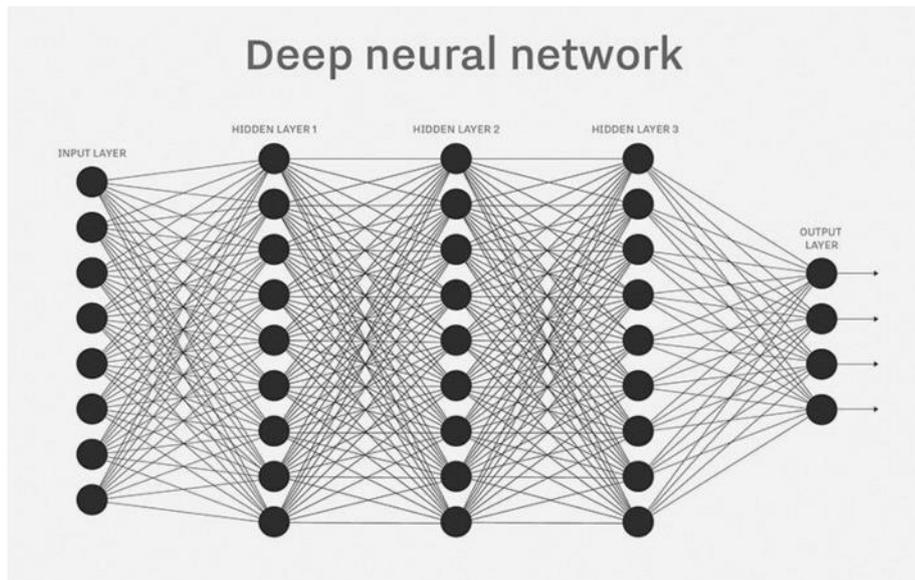
1.3.2.2 L'apprentissage profond (Deep Learning) :

Le Deep Learning est une sous-discipline du Machine Learning qui utilise des réseaux de neurones artificiels (artificial neural network ou ANN) pour apprendre à partir de données. Les ANN sont des modèles mathématiques qui sont conçus pour fonctionner comme le cerveau humain en traitant des informations à travers des couches de neurones interconnectés.

La profondeur des réseaux de neurones permet aux modèles d'apprendre des caractéristiques complexes et abstraites des données d'entrée. Par exemple, dans le cas de la reconnaissance d'images, les premières couches du réseau de neurones peuvent apprendre à reconnaître des caractéristiques basiques telles que les contours et les formes simples, tandis que les couches suivantes peuvent apprendre à reconnaître des caractéristiques plus complexes comme les textures et les motifs.

L'entraînement d'un réseau de neurones en Deep Learning implique généralement l'utilisation d'un ensemble de données d'apprentissage qui contient des exemples étiquetés ou des objectifs à atteindre. Le modèle ajuste alors ses poids et ses biais en fonction des erreurs commises lors de la prédiction des étiquettes ou des objectifs. Ce processus est répété plusieurs fois, avec des ajustements progressifs des poids et des biais, jusqu'à ce que le modèle atteigne une performance satisfaisante sur les données de validation ou de test (7).

Figure 3 : Architecture d'un réseau de neurones profond



Source : Duval, « L'Intelligence artificielle explicable, enjeu majeur pour ouvrir les "boîtes noires" », 2021

Les réseaux de neurones en Deep Learning peuvent être utilisés pour une variété de tâches, telles que la reconnaissance d'images, la reconnaissance de la parole, la traduction automatique, la génération de texte, la recommandation de produits et bien plus encore. Les applications du Deep Learning sont très diverses et en constante expansion.

Cependant, l'entraînement de réseaux de neurones en Deep Learning peut être coûteux en termes de temps et de puissance de calcul, en particulier pour les réseaux de neurones très profonds. De plus, les réseaux de neurones en Deep Learning sont souvent considérés comme des boîtes noires, car il peut être difficile de comprendre comment les modèles prennent leurs décisions ou comment ils sont parvenus à leurs prédictions. Des méthodes sont en cours de développement pour rendre les modèles plus transparents et interprétables.

1.3.2.3 Le traitement du langage naturel (Natural Language Processing ou NLP) :

Le traitement du langage naturel (NLP) est une branche de l'intelligence artificielle qui se concentre sur la compréhension, la génération et la manipulation du langage naturel par les machines.

Le NLP peut être utilisé pour diverses tâches, telles que la traduction automatique, la génération de texte, la reconnaissance de la parole, l'analyse de sentiments, le résumé de texte, et bien plus encore.

Le NLP peut également être utilisé pour aider les machines à communiquer avec les humains de manière plus naturelle, par exemple en utilisant des chatbots ou des assistants vocaux.

La plupart des consommateurs ont ainsi probablement été en contact avec le NLP sans s'en rendre compte. Par exemple, le NLP est la technologie de base des assistants virtuels, tels que Siri, Cortana ou Alexa. Lorsque nous posons des questions à ces assistants virtuels, le NLP leur permet non seulement de comprendre la demande de l'utilisateur, mais aussi de répondre en langage naturel.

Le traitement du langage naturel utilise généralement des techniques de machine learning, telles que l'apprentissage supervisé, non supervisé ou par renforcement, pour entraîner des modèles à partir de données textuelles.

Le prétraitement des données est une étape importante du traitement du langage naturel. Cela peut inclure l'extraction de caractéristiques (par exemple, la fréquence des mots) à partir des données textuelles, la normalisation des données (par exemple, en mettant en minuscule tous les mots), la suppression des mots inutiles (par exemple, les mots de liaison) ou encore la correction des fautes d'orthographe.

Ensuite, le modèle est entraîné à partir des données prétraitées pour effectuer une tâche spécifique, comme la classification de texte ou la génération de texte. Les modèles utilisés en NLP peuvent être des modèles de régression logistique, des réseaux de neurones, des modèles de Markov cachés, des arbres de décision, ou d'autres types de modèles.

Le traitement du langage naturel est un défi car celui-ci peut être ambigu, subtil et complexe. Les machines peuvent achopper sur les nuances du langage et les références culturelles. C'est pourquoi le traitement du langage naturel reste un domaine de recherche, avec de nouvelles techniques et de nouveaux modèles à développer pour affiner la capacité des machines à manipuler le langage naturel.

1.3.2.4 La vision par ordinateur (Computer Vision) :

La vision par ordinateur concerne la compréhension, l'analyse et la manipulation d'images et de vidéos par les machines.

La vision par ordinateur utilise des techniques de traitement d'image pour extraire des informations des images et des vidéos, telles que la détection d'objets, la reconnaissance faciale, la reconnaissance

de texte, la segmentation d'image, etc. Les images peuvent émaner d'appareils photo, de caméras de sécurité, de drones, de satellites, etc.

Le traitement des images et des vidéos nécessite une grande quantité de données et une importante puissance de calcul. En effet, le traitement de l'image implique d'abord la conversion de l'image ou de la vidéo en données numériques. Ensuite, les techniques de traitement d'image proprement dites permettent d'extraire les caractéristiques visuelles de l'image, telles que les bords, les coins, les textures, les couleurs, etc.

Une fois ces caractéristiques visuelles extraites, les algorithmes de vision par ordinateur s'appliquent pour la reconnaissance faciale, la détection d'objets, la reconnaissance de texte, etc. Ces algorithmes peuvent être supervisés, ce qui signifie qu'ils ont été entraînés sur un ensemble de données annotées, ou non supervisés, ce qui signifie qu'ils trouvent des modèles dans les données sans annotations.

Les exemples d'applications de la vision par ordinateur sont nombreux, on peut citer notamment :

- La reconnaissance faciale pour l'authentification et la sécurité
- La détection de mouvements dans les jeux vidéo, la réalité augmentée ou les capteurs de sécurité
- La détection d'objets pour les véhicules autonomes, la circulation ou la sécurité dans les aéroports
- La reconnaissance optique de caractère pour la numérisation de documents ou la reconnaissance de texte à partir d'image

Figure 4 : Utilisation de la vision par ordinateur sur un véhicule semi-autonome Tesla



Source : Tesla, logiciel autopilote full self driving, 2020

1.3.2.5 Les réseaux de neurones convolutifs (Convolutional Neural Network, CNN)

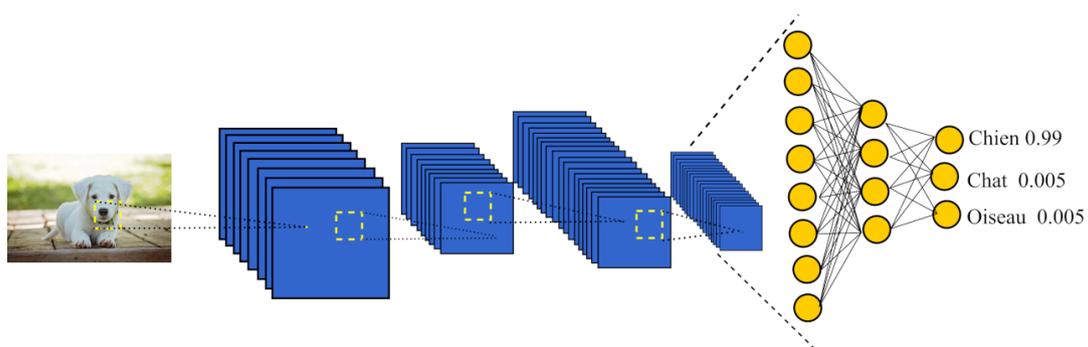
Les réseaux de neurones convolutifs, ou réseaux de neurones à convolution, correspondent à une technique d'apprentissage automatique basée sur une architecture de réseau de neurones profonds qui ont été spécifiquement conçus pour l'analyse d'images.

Leur fonctionnement est inspiré de la façon dont le cerveau humain traite les images : les neurones spécialisés dans la détection des bords et des contours des images se trouvent dans les premières couches du cerveau, tandis que les neurones spécialisés dans des caractéristiques plus complexes telles que les formes et les objets se trouvent dans des couches plus profondes.

Un CNN fonctionne de manière similaire. Il est composé de couches de neurones artificiels, appelés "filtres", qui sont conçus pour détecter des caractéristiques visuelles simples, comme des bords ou des motifs. Ces filtres sont appliqués à différentes régions de l'image pour détecter ces caractéristiques, cette étape est appelée convolution. Ensuite, les informations de ces filtres sont combinées dans des couches plus profondes du CNN pour détecter des caractéristiques de plus en plus complexes, comme des formes, des parties d'objets, et finalement l'objet lui-même (8).

Les CNN ne remplacent pas la vision par ordinateur mais ils apportent des avantages et des améliorations significatives à la discipline notamment grâce aux techniques de Machine Learning, à l'extraction automatique des caractéristiques, une précision très élevée, une excellente adaptabilité et une grande efficacité par le traitement de grandes quantités de données en parallèle.

Figure 5 : Architecture classique d'un réseau de neurones convolutifs



Source : Kongakura, « Réseaux de neurones convolutionnels / réseaux de neurones convolutifs ». 2019.

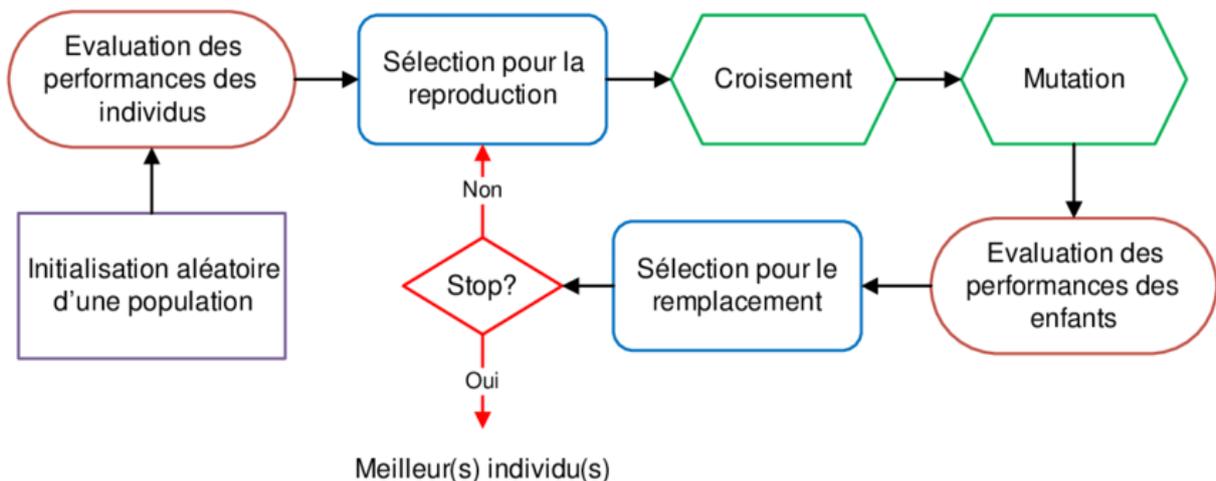
1.3.2.6 L'IA évolutive (Evolutionary Computing)

L'IA évolutive est une méthode d'optimisation basée sur la théorie de l'évolution de Darwin. Elle s'inspire de la manière dont les êtres vivants évoluent au fil du temps et s'adaptent à leur environnement pour trouver des solutions efficaces à des problèmes complexes. Elle utilise des algorithmes génétiques pour faire évoluer une population de solutions possibles jusqu'à ce que les meilleures solutions soient trouvées.

Son fonctionnement peut être simplifié en plusieurs étapes :

1. Initialisation : l'algorithme génère une population de solutions aléatoires.
2. Évaluation : chaque solution est évaluée en fonction d'un critère de performance. Les solutions qui obtiennent les meilleures notes sont sélectionnées pour la prochaine étape.
3. Sélection : les solutions sélectionnées sont utilisées pour générer une nouvelle population de solutions en appliquant des opérations de reproduction, de mutation et de croisement.
4. Répétition : les étapes 2 et 3 sont répétées jusqu'à ce qu'une solution satisfaisante soit trouvée.

Figure 6 : Fonctionnement simplifié d'un algorithme génétique



Source : Boussaid, « Improvement of metaheuristics for continuous optimization », 2013.

Le processus est itératif, ce qui signifie que les solutions sont constamment améliorées au fil des générations. Les solutions qui obtiennent les meilleures notes ont plus de chances d'être sélectionnées pour la prochaine génération, tandis que les solutions qui obtiennent de moins bonnes notes sont éliminées (9).

L'IA évolutive peut être utilisée pour résoudre une grande variété de problèmes, tels que la conception de systèmes de contrôle, la planification de trajets pour les robots, la conception de molécules pour les médicaments, l'optimisation de portefeuilles d'investissement et bien plus encore.

1.4 Exemples d'applications de l'intelligence artificielle dans le domaine médical

Ces dernières années, les technologies médicales alimentées par l'IA ont rapidement évolué vers des applications possibles dans la pratique clinique. Les algorithmes d'apprentissage en profondeur de l'IA peuvent traiter des quantités massives de données fournies par des capteurs de surveillance mobiles, des wearables, des smartphones et des appareils d'imagerie médicale pour diagnostiquer rapidement les maladies, détecter les anomalies et personnaliser les traitements (12,13).

Les progrès de l'IA dans le domaine médical offrent ainsi des opportunités considérables pour améliorer les résultats cliniques et la qualité des soins.

Nous citerons ici des exemples de domaines d'applications de l'IA en médecine, il s'agira bien sûr d'une liste non-exhaustive, les applications étant très nombreuses et en constante augmentation.

1.4.1 Cardiologie

L'une des premières applications de l'IA en médecine a été la détection précoce des fibrillations auriculaires. Depuis, de nombreuses applications se sont développées. Les techniques d'apprentissage des réseaux neurones profonds ont notamment rendu possible une analyse beaucoup plus fine et plus poussée des données de l'électrocardiogrammes (ECG) qui constitue un examen majeur dans ce domaine. L'utilisation de l'IA permet ainsi de dépister des troubles du rythme cardiaque ou de la conduction cardiaque mais aussi de diagnostiquer des anomalies du muscle cardiaque ou de la circulation qui auraient pu ne pas être détectées par un humain.

Beaucoup d'applications concernent les appareils portables afin de permettre un suivi des patients à domicile. Apple a par exemple obtenu la certification de la FDA pour implémenter un système d'acquisition d'ECG dans son Apple Watch capable de détecter de potentiels signes de pathologies cardio-vasculaires et de transmettre directement les données au médecin traitant.

En plus de l'aide au diagnostic, l'IA peut aussi être utilisée en cardiologie interventionnelle pour aider à l'amélioration des procédures de cathétérisme cardiaque en aidant les médecins à planifier et à exécuter ces procédures de façon plus précise et plus efficace (11).

1.4.2 Radiologie

L'utilisation de l'IA en radiologie a permis de grandes avancées avec l'amélioration de la précision et de la rapidité des diagnostics, ainsi que la réduction des erreurs humaines ou l'optimisation des traitements.

En effet, l'œil humain n'est pas parfait et ses performances dépendent de l'expérience acquise par le praticien, celui-ci pouvant également se fatiguer et perdre en efficacité au fil du temps. L'IA peut ainsi aider à réduire les erreurs humaines en détectant des anomalies que les radiologues peuvent manquer, ou en fournissant une deuxième opinion pour aider à confirmer ou à réfuter un diagnostic. L'analyse d'imageries médicales par Deep Learning peut ainsi s'appliquer pour de multiples domaines (10) tel que par exemple :

- La détection de tumeurs surtout dans le cadre du dépistage précoce de cancers, comme le cancer du sein.
- L'analyse de l'imagerie pulmonaire pour la détection d'anomalies telles que des nodules ou des lésions ainsi que l'évaluation de la gravité de certaines pathologies comme la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO).
- La détection de rétinopathies diabétique à partir d'images de la rétine pour le dépistage et le suivi des patients diabétiques.
- Le suivi de la croissance foetale à partir d'échographies et en fournissant des informations plus précises sur la taille et le poids du fœtus.
- La détection d'une fracture et une analyse plus précise de ses caractéristiques.

Par exemple, l'algorithme Boneview® développé par Incepto vise à proposer un outil d'aide à la décision pour la détection des fractures osseuses.

Selon une étude réalisée en 2021 conduite auprès de 6 radiologues et 6 urgentistes sur 600 examens, Boneview® permettrait de diminuer jusqu'à 30% les fractures manquées (amélioration plus faible chez les praticien expérimentés) et augmente la spécificité (de 5%) et la sensibilité (de 12%) chez l'ensemble

du personnel de santé. Enfin, l'IA a permis de réduire la quantité de faux positifs par patient sans fracture de 41,9% et le temps moyen de lecture de 15% (14).

1.4.3 Cancérologie

L'IA fait partie de ces technologies importantes susceptibles de changer la façon d'aborder le traitement du cancer avec de multiples domaines d'exploitation.

Prévention :

On peut citer notamment l'analyse de données permettant d'identifier des personnes à risque élevé de développer un cancer ou de détecter un cancer à un stade plus précoce. Cette méthode permet également de faire appel à des techniques moins invasives que celles utilisées traditionnellement (imageries, biopsies, analyse sanguines).

Diagnostic :

L'utilisation de l'IA a également pour but de soutenir le processus de diagnostic du cancer et d'en accroître l'efficacité, que ce soit par la classification des résultats histopathologiques incluant le repérage de biomarqueurs mais également par l'examen des images cliniques et diagnostiques (endoscopie, lésions cutanées, IRM, tomodensitogramme etc...), la segmentation des images voir même la mise en surbrillance de zones douteuses permettant de classer des résultats et faciliter l'examen par l'oncologue ou le radiologue.

Choix thérapeutique :

En plus du diagnostic, l'IA peut être utile pour la prise de décision relative au traitement du cancer et à sa planification par le regroupement et l'analyse de grandes quantités de données concernant le patient, des publications ou d'autres types de données médicales comme des antécédents de cas similaires ou des plans de traitements antérieurs dans le but d'orienter le traitement individuel (15).

Le suivi :

L'IA peut également fournir un appui quant au suivi des patients et leur accompagnement par :

- L'établissement de pronostics sur la progression de la maladie, le taux de survie et la réponse au traitement afin d'adapter la prise en charge.
- L'amélioration de l'observation et la prise en charge proactive des symptômes et complications
- l'amélioration de l'expérience du patient par la transmission simplifiée de renseignements et la personnalisation d'un soutien répondant à ses besoins particuliers.

1.4.4 Neurologie

Dans le domaine de la neurologie, le diagnostic précoce des maladies neurodégénératives constitue un défi majeur. En analysant des données provenant de diverses sources, comme des tests cognitifs, des images cérébrales ou des marqueurs biologiques, l'IA peut détecter les premiers signes de maladies telles que la maladie d'Alzheimer ou de Parkinson.

La détection et le suivi des crises épileptiques peuvent également faire appel à l'IA en analysant les données d'électroencéphalogramme (EEG) et en alertant les professionnels de santé lorsque des anomalies sont détectées.

En 2018, Empatica a obtenu l'approbation de la FDA pour son bracelet Embrace®. Associé à des capteurs électrodermiques, il détecte les crises d'épilepsie généralisées, les signale à une application mobile laquelle alerte les proches et le médecin traitant avec des informations complémentaires sur la localisation du patient. Un rapport axé sur l'expérience des patients a révélé que, contrairement aux dispositifs de surveillance cardiaque, les patients souffrant d'épilepsie n'avaient aucune barrière à l'adoption des dispositifs de détection de crises, et ont exprimé un grand intérêt pour l'utilisation de ces dispositifs portables (16).

L'IA est également de plus en plus utilisée dans la détection et le suivi des troubles du sommeil tel que l'apnée du sommeil en analysant les données provenant de dispositifs de suivi du sommeil comme des bracelets fitness, des capteurs de mouvements ou des EEG portables.

1.4.5 Industrie pharmaceutique

Dans le modèle traditionnel, la production de médicaments nécessite une longue période, comprenant des études de cibles fonctionnelles, des études de conception d'ingrédients médicamenteux, des tests de performance, des essais cliniques ; ainsi, même après une longue période de recherche, les nouveaux médicaments peuvent ne pas fonctionner aussi bien que prévu. Cependant, le développement de l'IA ces dernières années a considérablement modifié l'approche traditionnelle de l'industrie dans le développement de nouveaux médicaments, facilitant ainsi la découverte et l'assemblage de nouveaux composants.

L'application de modèles de prédiction dans la conception de vaccins a efficacement accéléré les processus d'essais cliniques et réduit les coûts et la durée de la recherche et du développement. Il est ainsi possible par des techniques de DP de cibler des protéines clés des mécanismes pathologiques, ce

qui était autrefois impossible. De plus, la recherche d'outils et de méthodes de bioinformatique assistés par l'IA ouvre un avenir prometteur pour la thérapie par petites molécules médicamenteuses (17).

Par exemple, Insilico Medicine a utilisé des algorithmes d'apprentissage profond pour identifier des composés candidats pour le traitement de la fibrose pulmonaire idiopathique. Selon les meneurs du projet, seuls 46 jours auront été nécessaires pour sélectionner la molécule en générant 30 000 modèles, contre quelques années au minimum avec les méthodes conventionnelles, avec pour objectif de cibler une protéine en lien avec la fibrose (18).

2 : Le potentiel de l'IA en réhabilitation orale implantaire : du projet à la réhabilitation prothétique

2.1 Dépistage, diagnostic et facteurs de risque

2.1.1 Un mot sur l'IA en prévention bucco-dentaire

Ces dernières années, la profession s'est tournée vers une approche de plus en plus conservatrice dans la totalité des spécialités en établissant un gradient thérapeutique dans l'approche du traitement des pathologies dentaires. Dans cette approche conservatrice, la prévention et le dépistage des maladies dentaires constitue une étape essentielle permettant d'intercepter de manière précoce des pathologies et ainsi d'améliorer le pronostic avec des soins moins invasifs.

Les méthodes de prévention et de dépistage traditionnelles incluent notamment une bonne hygiène bucco-dentaire avec brossage régulier, bain de bouche, et des examens dentaires réguliers cliniques et radiographiques afin de détecter des problèmes tels que des caries, maladies parodontales, infections ou lésions précoces.

L'introduction de l'intelligence artificielle dans le domaine de la prévention que ce soit en parodontologie, en cariologie, en endodontie, en santé publique améliore l'identification des patients les plus à risque de développer une pathologie et d'aboutir à terme à l'avulsion et donc au recours implantaire.

Par exemple, la maladie parodontale possède une part de génétique et un risque de progression rapide qui compromet non seulement le pronostic dentaire mais aussi l'éventuel traitement implantaire à cause de l'alvéolyse importante. L'utilisation de modèles de prédiction basés sur des techniques de Machine Learning a été exploré dans plusieurs études.

Une étude de 2022 ayant pour but de développer et de tester un modèle de prédiction des maladies parodontales (MP) utilise du ML associé à des données de dossiers électroniques. De nouvelles associations et caractéristiques par rapport aux modèles existants ont ainsi été identifiées ; on peut citer l'anxiété du patient, les problèmes de mastication, les troubles de phonation, le bruxisme, la présence de prothèses partielles amovibles, l'image de soi, les drogues récréatives (héroïne et

marijuana), et les affections générales telles que l'ostéoporose, cancer, affections neurologiques, les maladies infectieuses. Cette étude pilote a démontré des résultats prometteurs dans la prédiction du risque de MP. Ce type de modèle peut fournir de nouvelles informations aux cliniciens sur les risques de MP et les facteurs responsables de la progression de la maladie (19,21). D'autres études ont également développé des modèles de prédiction du risque carieux en fonction des facteurs génétiques et environnementaux (20).

2.1.2 Dépistage et patients à risque

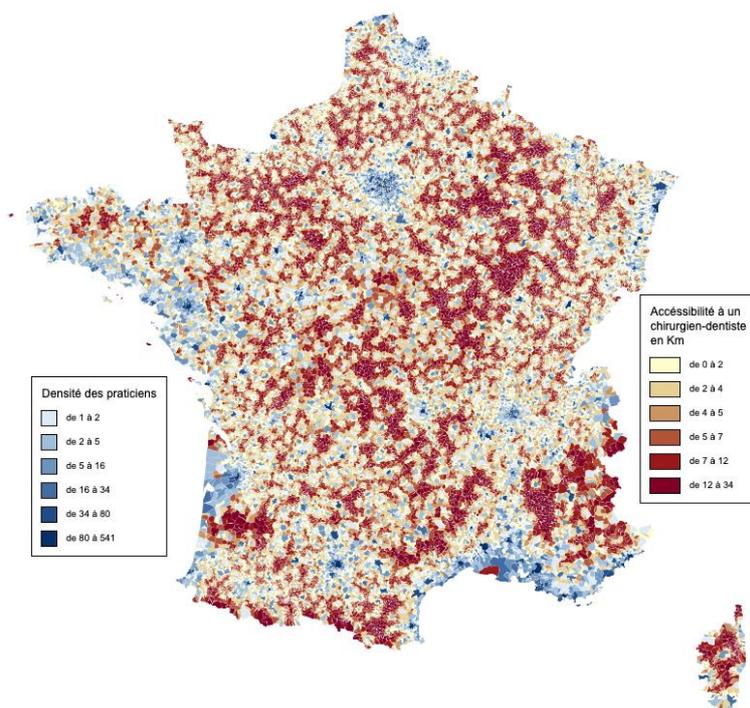
Le recours aux implants dentaires a connu une forte croissance ces dernières années en raison de plusieurs facteurs, notamment :

- Augmentation de l'espérance de vie : L'OMS établit ainsi que d'ici à 2030, une personne sur six dans le monde aura 60 ans ou plus. Dans le même temps, la population âgée de 60 ans et plus passera de 1 milliard de personnes en 2020 à 1,4 milliard. L'indice CAO (indice moyen de dents cariées, absentes et obturées) des personnes entre 65 et 74 ans est de $23,3 \pm 7,4$ (UFSBD 2009). La population vieillit et le nombre de dents perdues par arcade des personnes de plus de 60 ans augmente également.
- Amélioration des technologies d'implants dentaires : la conception et la fabrication des implants dentaires, les procédures de pose répondant aux bonnes pratiques, la formation des praticiens, les matériaux prothétiques ont rendu les traitements implantaires dentaires plus sûrs, plus confortables et plus accessibles.
- Sensibilisation accrue à la santé bucco-dentaire : prise de conscience de la nécessité de remplacer les dents manquantes ou endommagées pour limiter des problèmes de santé bucco-dentaire à long terme.
- Préoccupation accrue pour l'apparence.

La question est aussi de savoir si l'offre de soins implantaires est suffisante et cela dépend de divers facteurs tels que la localisation géographique, le niveau de compétence et d'expérience des praticiens, la disponibilité des équipements et des matériaux, et la capacité des systèmes de santé à répondre à la demande.

Dans certaines régions en France et dans le monde, il y a une pénurie de dentistes formés à l'implantologie, ce qui limite l'offre de services d'implants. Les hôpitaux et les dentistes présents dans ces déserts médicaux sont donc souvent surchargés avec une liste d'attente très longue pour des patients demandant des implants.

Figure 7 : Répartition des chirurgiens-dentistes en France



Source : Ordre national des chirurgiens-dentistes, 2016

C'est dans cette optique que l'IA trouve son intérêt ; il serait ainsi possible d'imaginer des algorithmes visant à identifier les patients qui seraient plus susceptibles d'avoir besoin d'implants à un temps donné, permettant de mieux anticiper l'offre et d'organiser les files d'attente.

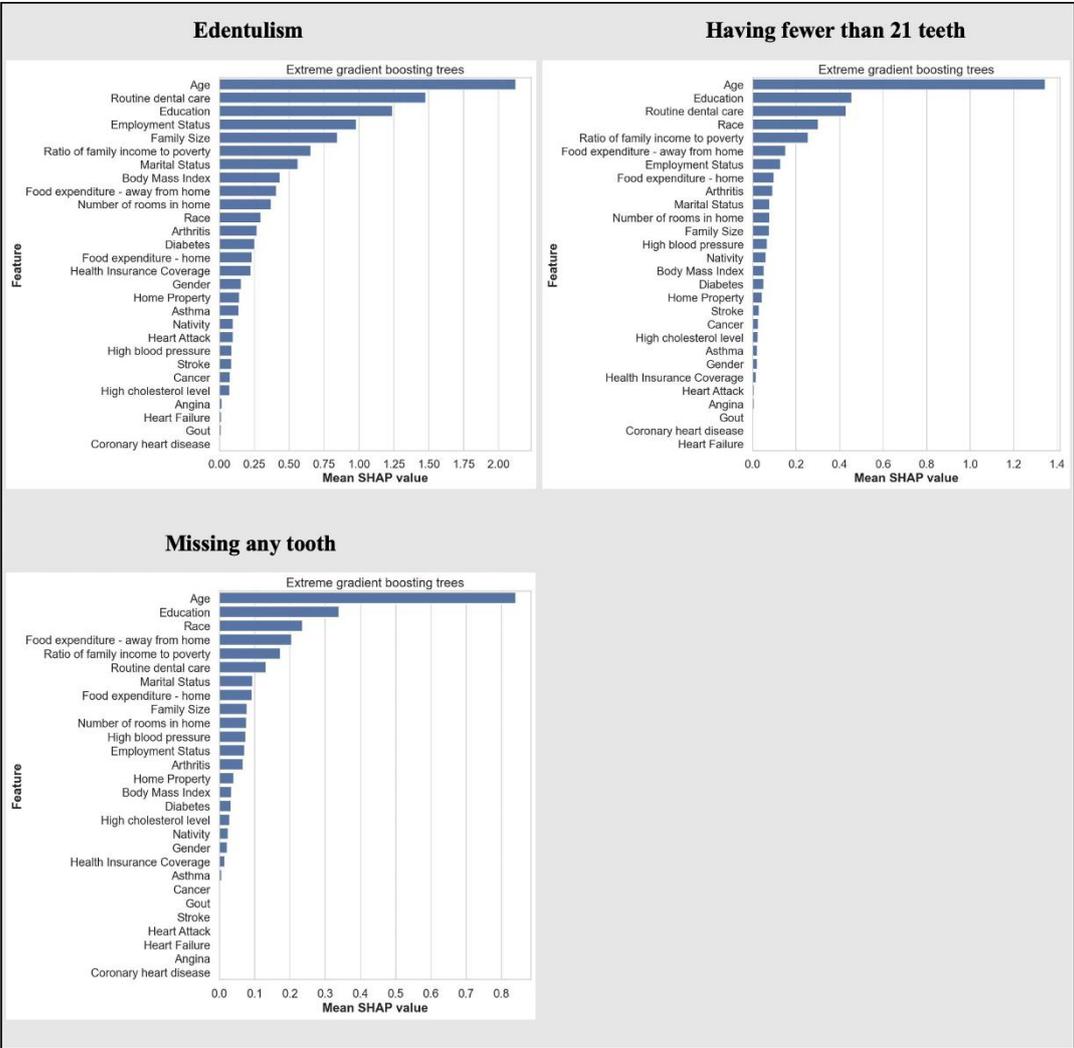
Cette application potentielle, encore au stade de recherche, peut cependant poser des problèmes au niveau éthique avec des risques d'installations sur des zones sous-dotées uniquement par but lucratif engendrant de nouveaux déséquilibres dans un contexte social où cet équilibre constitue un défi. Ces risques devront être anticipés et strictement encadrés pour éviter toute dérive.

Une étude de 2021 vise ainsi à prédire de façon précise les pertes dentaires en utilisant des techniques d'apprentissage basées sur des données socio-économiques et médicales. Dans ce but, les données de 5864 patients ont été utilisées pour entraîner les algorithmes tandis que les données de 6113 autres utilisées pour les tester à l'aveugle. Ceux-ci ont été placés dans 3 groupes selon le nombre de dents absentes : édenté complet, moins de 20 dents et au moins une dent manquante.

Au total, deux analyses ont été réalisées, la 1ère avec 28 caractéristiques socio-économiques, médicales et dentaires et la 2ème avec 5 caractéristiques incluant des données d'examen clinique (délabrement dentaire, maladie parodontale).

Les résultats ont ainsi permis d'identifier les variables ayant le plus d'impact dans la prédiction de perte dentaire : L'âge, l'éducation, les contrôles de routine, l'emploi, le rapport entre le revenu familial et le seuil de pauvreté, la race et la propriété immobilière étaient des prédicteurs forts de la perte de dents. Bien que moins significatives, des affections médicales telles que l'arthrite, le diabète, le cholestérol élevé, l'hypertension et les maladies cardiovasculaires figuraient également parmi la liste des prédicteurs (24).

Figure 8 : Classement des facteurs ayant un impact sur le risque de perte dentaire



Source: Elani et al., « Predictors of tooth loss : a machine learning approach », 2021.

Une autre étude réalisée en 2022 a ainsi utilisé 4 algorithmes différents de ML dans le but de prédire les patients susceptibles de nécessiter une prise en charge implantaire en se basant sur des données antérieures et des symptômes actuels.

Six facteurs de risque ont été identifiés au travers des revues de littérature ; l'âge du patient, la présence de couronnes dentaires, le niveau de préoccupation des soins bucco-dentaires, le régime alimentaire, l'assurance médicale et les pathologies.

Pour entrainer les algorithmes d'apprentissage une enquête a été réalisée avec des questions reprenant les facteurs de risques avec pour réponse les valeurs associées (Tableau 1). La précision de l'apprentissage de l'algorithme dépend de la quantité de données disponibles pour l'améliorer. Dans cette enquête, 107 participants ont répondu aux questions.

Tableau 1 : Facteurs utilisés pour l'étude et leurs états

N°	Facteur	Etat 1	Etat 2	Etat 3
1	Age	Moins de 20	Entre 20 et 40	Plus de 40
2	Couronnes dentaires	Oui	Non	—
3	Préoccupation aux soins	Toujours	Parfois	Rarement
4	Régime alimentaire	Sain	Malsain	—
5	Assurance médicale	Oui	Non	—
6	Autres pathologies	Oui	Non	—

Source : Alharbi et al., « Prediction of dental implants using machine learning algorithms », 2022.

Une fois l'algorithme entraîné avec les données obtenues, des cas de patients présentant des états de facteurs différents lui ont été soumis afin de déterminer si ces patients seraient susceptibles d'avoir besoin d'implants ou pas. Cela a été réalisé avec 4 algorithmes afin de pouvoir comparer le niveau de précision de la prédiction de chacun (22).

L'étude ne prend en compte que très peu de facteurs de risques et se base sur un échantillon assez limité pour l'apprentissage. Il sera donc nécessaire d'augmenter la taille de l'échantillon utilisé mais également d'identifier plus de paramètres à prendre en compte pour améliorer la fiabilité des algorithmes.

Ces études laissent ainsi entrevoir la possibilité d'utiliser l'IA pour évaluer les facteurs ayant un impact dans le dépistage des patients qui nécessiteront des implants dans le futur permettant donc d'accélérer et de fluidifier leur prise en charge. L'application de cette technologie dans le domaine n'en est encore qu'à ses débuts et très peu de recherches ont déjà été publiées sur le sujet mais de nombreuses sont en cours actuellement.

Il est cependant nécessaire de préciser que la recherche de conflits d'intérêts constitue un élément essentiel dans ce genre d'études notamment par les profits financiers qu'elles peuvent engendrer à travers les données récoltées et les résultats obtenus. Cet aspect sera développé dans la troisième partie de cette thèse.

Dans le cas des études que nous avons citées, les auteurs déclarent ne présenter aucun conflit d'intérêts et ont reçu le support d'institutions nationales.

2.1.3 Aide au diagnostic pré-implantaire

Souvent plusieurs options se présentent pour résoudre une situation clinique. L'option thérapeutique conservatrice doit toujours rester présente à l'esprit. En revanche, quand le pronostic des dents est mauvais, l'avulsion dentaire doit être envisagée au plus vite, car garder des dents au pronostic réservé peut entraîner une perte importante des tissus de soutien.

Dans le cas d'une maladie parodontale, une dent présentant un mauvais pronostic peut aggraver l'alvéolyse ce qui complique la mise en place d'un implant. De même dans le cas de lésion d'origine endodontique, la persistance d'un foyer infectieux peut entraîner perte osseuse apicale importante.

L'évaluation du pronostic d'une dent est donc un élément essentiel parfois délicat et dépend de multiples facteurs liés au patient (pathologies, antécédent dentaires, hygiène, ...) et à l'expérience du praticien. C'est donc dans ce domaine que l'IA peut aider à établir plus objectivement le pronostic d'une dent.

Une étude réalisée en 2022 par la Harvard Medical School et ayant pour but de créer un algorithme basé sur des techniques de ML a pour ambition de déterminer le pronostic d'une dent et ce, quelle que soit la spécialité concernée. Cette étude utilise les données cliniques de 94 patients soit un total de 2359 dents. 17 paramètres clés ont ainsi été choisis pour l'apprentissage qui prennent en compte

l'historique médical, dentaire, familial, social, des données cliniques et radiographiques, des facteurs endodontiques, parodontaux, prothétiques et orthodontiques.

Tableau 2 : Critères utilisés dans l'étude pour déterminer le pronostic dentaire

1	2		3	4	5
Etat de santé générale	Conditions des tissus durs et problèmes		Situation parodontale	Situation endodontique	Plan d'occlusion, forme de l'arcade et DVO
<ul style="list-style-type: none"> • 1-1 Condition médicale - Ostéoporose - Biphosphonate - Anticoagulants - Diabète - Tabac - Radiothérapie - Chimiothérapie - Hypertension artérielle • 1-2 Condition bucco-dentaire - Mauvaise hygiène bucco-dentaire - Xérostomie - Boulimie - Reflux acide - Bruxisme - Mauvaise alimentation 	<ul style="list-style-type: none"> • 2-1 Etat dentaire - Pas de restauration - Composite - Amalgame - Inlay/Onlay - Couronne - Facette - Bridge - Couronne supra-implantaire - Ancre radicalaire - Dent manquante - Racine résiduelle - Dent incluse 	<ul style="list-style-type: none"> • 2-2 Problèmes - Pas de caries - Pas de problèmes antérieurs - Caries primaires/secondaires - Caries radiculaires - Erosion /abrasion/abfraction - Joint marginal ouvert - Fêlure - Fracture - Ancreage manquant/mauvais 	<ul style="list-style-type: none"> • 3-1 Support osseux • 3-2 Elongation coronaire nécessaire • 3-3 Atteinte de la furcation • 3-4 Mobilité • 3-5 Difficulté de nettoyage 	<ul style="list-style-type: none"> • 4-1 Statut endodontique • 4-2 Anatomie dentaire • 4-3 Perforation • 4-4 Fêlure/fracture • 4-5 Résorption radiculaire 	<ul style="list-style-type: none"> • 5-1 Egression/intrusion • 5-2 Position dentaire • 5-3 DVO (Dimension verticale d'occlusion)

Source : Traduction de l'auteur d'après Lee et al., « Diagnosis of tooth prognosis using artificial intelligence », 2022.

16 évaluateurs (désignés comme modèle A) ont noté les pronostics de 2359 dents de 1 (indiquant un pronostic très défavorable nécessitant l'avulsion) à 5 (indiquant un pronostic et des conditions favorables à long terme).

Ensuite, un autre classement a été effectué (désigné comme modèle B) en excluant trois évaluateurs expérimentés du modèle A. Ces trois évaluateurs ont ensuite effectué une nouvelle évaluation trois mois plus tard pour établir un classement de référence "gold standard", sans avoir connaissance de leur classement initial. Ces données ont ensuite été utilisées pour entraîner trois modèles d'intelligence artificielle.

Les résultats ont ainsi permis d'identifier des facteurs susceptibles d'avoir un plus gros impact sur le pronostic. Par exemple, on observe une différence significative dans les valeurs observées selon le type de dents ; la valeur moyenne est ainsi plus élevée (meilleur pronostic) pour les canines, les incisives centrales et latérales que pour les prémolaires et molaires (23).

De plus, la valeur moyenne obtenue par apprentissage des algorithmes s'est révélée plus élevée que celle du gold standard. Parmi la totalité des dents étudiées, 69% correspondaient globalement au gold standard avec un degré de correspondance variable en fonction du type de dents. Les canines présentaient ainsi un taux de correspondance avec le classement de référence plus élevé que les molaires.

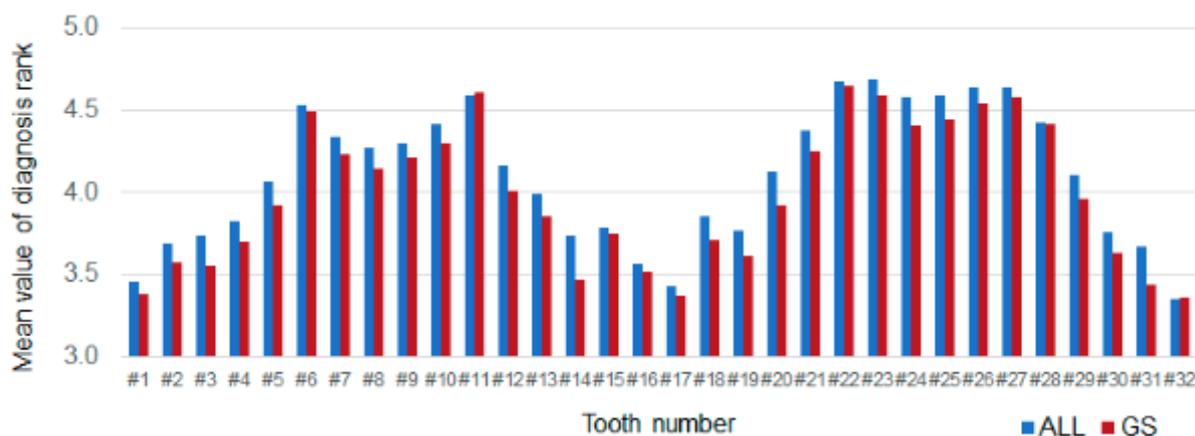


Figure 9 : Comparaison des valeurs moyennes obtenues par apprentissage (ALL) et celles du gold standard (GS)

Source : Lee et al., « Diagnosis of tooth prognosis using artificial intelligence », 2022.

Cette étude a nécessité d'entraîner l'IA sur des données à l'aveugle avec une grande quantité de données afin de réduire les biais. Ces résultats, bien que limités, montrent qu'il est possible d'utiliser l'IA comme outil pour déterminer le pronostic dentaire et identifier les facteurs les plus influents permettant ainsi un meilleur établissement du plan de traitement.

L'étude citée ici, réalisé à Harvard, ne semble pas faire l'objet de conflits d'intérêt.

2.2 Etablissement du projet prothétique et de ses alternatives

2.2.1 Analyse pré-implantaire et objectifs

Un succès thérapeutique allie fonction, esthétique et biologie. La réalisation d'un traitement implantaire ne peut être improvisée et l'implant n'est qu'un support pour arriver au remplacement prothétique des dents manquantes. L'objectif d'un projet implanto-prothétique vise non seulement à obtenir une bonne cicatrisation osseuse et muco-gingivale peri-implantaire mais aussi à favoriser le résultat esthétique et fonctionnel de la prothèse supra-implantaire.

Cependant, face à un cas clinique, souvent plusieurs solutions permettraient de répondre à la demande du patient. Afin d'affiner les alternatives et d'identifier les solutions les plus satisfaisantes pour obtenir le meilleur compromis sur les plans esthétique, fonctionnel et biologique, il est donc essentiel de réaliser une analyse pré-implantaire approfondie et rigoureuse (25).

1) Lors de la 1ère consultation, le praticien réalise un **entretien individuel** visant à évaluer le profil médical et psychologique du patient qui seront déterminants pour établir un pronostic thérapeutique:

- Ses antécédents médico-chirurgicaux (à la recherche de potentielles contre-indications)
- Son historique dentaire (causes ayant abouties à la situation actuelle)
- Son mode de vie (tabac, alcool, sport ...), situation familiale, professionnelle...

Cet entretien permet d'identifier la demande et les besoins du patient afin de déterminer certains facteurs de risques, sa compliance et son degré d'exigence en termes de confort, d'esthétique etc...

2) À la suite de l'entretien, il est nécessaire de réaliser un examen clinique en 2 parties :

- **Examen exo-buccal** : ouverture buccale, articulation temporo-mandibulaire, dimension verticale d'occlusion (DVO), analyse du sourire
- **Examen endo-buccal** : Bilan dentaire, bilan parodontal, bilan occlusal, analyse esthétique, analyse de l'édentement

Cet examen est complété par l'analyse occlusale sur simulateur physique ou numérique avant de pouvoir matérialiser le projet prothétique.

3) Des examens complémentaires sont également nécessaires pour compléter le diagnostic, analyser le volume osseux et de permettre un suivi de qualité :

- **Panoramique** : examen de débrouillage de 1ère intention, donne une idée de la hauteur osseuse disponible.
- **Bilan long-cône** : permet une analyse pré, per et post op de la situation notamment dans la phase chirurgicale.
- **Cone Beam Computed Tomography (CBCT)** : l'imagerie de référence dans ce domaine. Plus irradiant mais indispensable pour l'analyse pré-implantaire car il permet d'apprécier de façon précise le volume osseux en 3D, d'obtenir des informations sur les rapports anatomiques avec les différentes structures (sinus, nerfs ...) et de simuler la mise en place d'implants.

L'élaboration du projet prothétique a ainsi pour objectif :

- de valider avec le patient la position des futures dents prothétiques et l'esthétique du projet
- de mettre en évidence un déficit osseux et/ou muqueux et d'y remédier à l'aide d'artifices prothétiques ou de thérapeutiques chirurgicales complémentaires
- de vérifier les rapports occlusaux
- de créer un guide radiologique puis chirurgical
- d'être une réplique de la prothèse transitoire et de la future prothèse

2.2.2 Apport de l'IA dans la décision thérapeutique

Face à la demande de réhabilitation fonctionnelle et esthétique d'un patient, il existe plusieurs alternatives thérapeutiques, implantaire ou non, et présentant chacune ses avantages et inconvénients. Le choix est influencé par de multiples facteurs généraux (contre-indication, possibilités économiques, compliance, ...) ou spécifiques (volume osseux, espace prothétique, biomécanique...).

La décision thérapeutique repose sur l'évaluation des risques et du pronostic de chacune des différentes alternatives, des possibilités d'évolution et de renouvellement. Une solution peut en effet

promettre un résultat excellent à court terme mais avec un risque d'échec important à moyen ou long terme.

L'IA peut optimiser cette analyse afin de mieux répondre à la demande du patient avec un projet toujours plus personnalisé.

Des études tentent de prédire le risque d'échec d'un traitement implantaire mais également d'identifier de potentiels nouveaux facteurs pouvant moduler celui-ci. Des techniques de ML se basant sur des données antérieures de patients ont ainsi été appliquées dans de nombreuses études.

En 2018 à Taiwan une IA a été entraînée avec les données de 681 patients ayant reçu un traitement implantaire. Les résultats ont notamment permis d'établir les facteurs ayant un impact sur le succès implantaire et de les classer par ordre d'importance décroissante, on retrouve ainsi les facteurs suivants (26) :

- 1) Largeur de l'implant
- 2) Système de l'implant
- 3) Mastication de noix de bétel (très courante en Asie)
- 4) Augmentation de la hauteur de l'os
- 5) Longueur de l'implant
- 6) Consommation d'alcool
- 7) Augmentation sinusienne
- 8) Emplacement de l'implant
- 9) Moment de mise en place de l'implant (Immédiate, différée ...)
- 10) Facteurs de perte dentaire

Les résultats obtenus ont également permis de comparer les performances de prédiction des différentes techniques d'apprentissage testées et de déterminer ainsi le modèle optimal pour prévoir les échecs implantaires.

Il est ainsi possible d'imaginer des algorithmes permettant de déterminer le pronostic d'une thérapeutique de façon plus précise et ainsi mieux évaluer le rapport bénéfice-risque dans la prise de décision thérapeutique.

2.3 Aide à la planification implantaire

2.3.1 Objectifs

La planification implantaire constitue une étape indispensable. Une planification précise et minutieuse permet ainsi d'accroître les chances de succès du traitement en optimisant la mise en place de l'implant et en réduisant les risques chirurgicaux.

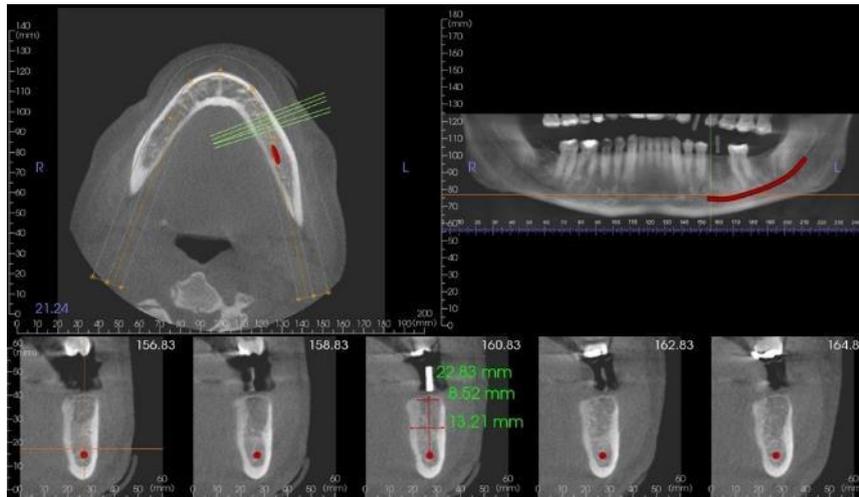
Différentes techniques radiographiques sont utilisées pour évaluer les caractéristiques de l'os alvéolaire telles que la qualité osseuse, sa hauteur et son épaisseur ainsi que les variations anatomiques dans la zone d'intervention comme la fosse nasale, le canal mandibulaire, le foramen mentonnier et les sinus.

La tomographie volumétrique à faisceau conique ou CBCT est actuellement la technique la plus utilisée pour la planification car elle offre des images 3D de haute qualité avec une dose de radiation faible et un temps de balayage court. Ces dispositifs sont très performants pour déterminer les dimensions idéales des implants avant l'opération et pour prédire les procédures chirurgicales complémentaires nécessaires en cas d'insuffisance osseuse sur le site d'intervention (27).

La planification implantaire a donc pour objectif de déterminer :

- Le nombre d'implants et la répartition
- La longueur
- Le diamètre
- Le positionnement
- L'axe

Figure 10 : Identification d'un site implantaire potentiel à l'aide d'un CBCT



Source : Regina et al., « Cone-beam computer tomography (CBCT) applications in dentistry », 2017.

À l'issue de cette analyse trois situations possibles :

1. Le projet implantaire est en accord le volume osseux disponible et d'axe. Un implant de diamètre, de longueur et d'axe idéaux peut être planifié.
2. Le projet implantaire est en léger décalage avec les possibilités osseuses : ce cas conduit à modifier la position de l'implant et/ou utiliser des compensations prothétiques (piliers angulés par exemple).
3. Le projet implantaire est incompatible avec le volume osseux sous-jacent. Dans ce cas, soit on renonce à la solution implantaire avec des techniques prothétiques sur dents naturelles ou de prothèse amovible, soit on met en œuvre des techniques de reconstruction osseuse pour recréer un volume osseux en adéquation avec le projet prothétique (comblement sinusien, greffe osseuse, expansion de crête ...).

2.3.2 Apport de l'IA

Les connaissances, les compétences et l'expérience du praticien dans l'interprétation des images CBCT jouent également un rôle très important pour aboutir à une planification détaillée et pertinente.

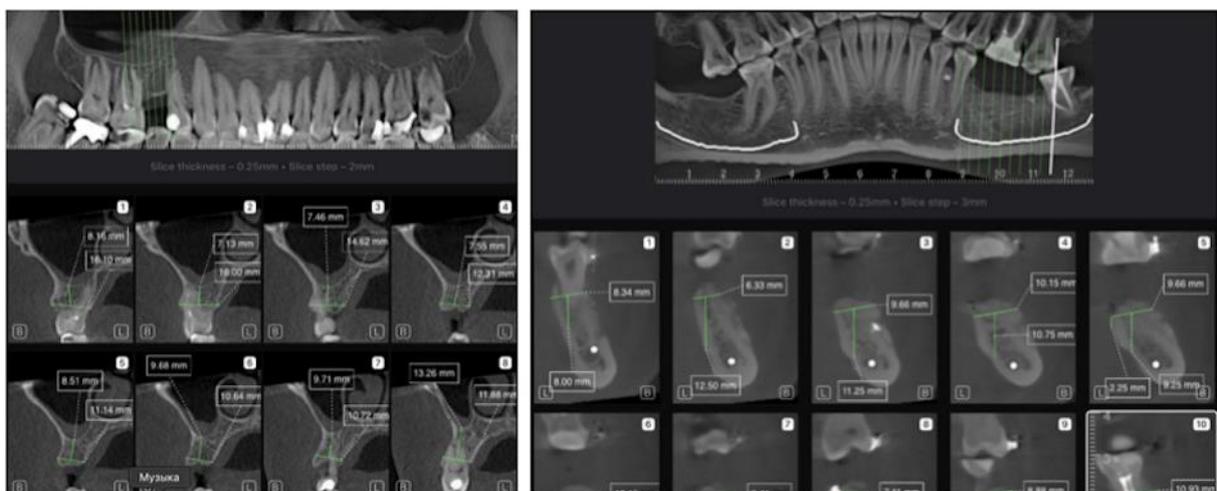
L'utilisation de systèmes d'intelligence artificielle dans l'interprétation radiographique présente de nombreux avantages pour le médecin. Elle peut constituer une alerte de mauvais diagnostics et/ou de plans de traitement erronés ainsi qu'à une perte de temps.

À travers des techniques d'apprentissage appliquées sur des bases de données médicales antérieures, il est ainsi possible d'imaginer des algorithmes permettant d'analyser l'imagerie 3D d'un patient afin d'identifier les risques anatomiques et les caractéristiques de l'os alvéolaire. Avec ces données associées aux autres examens et au dossier médical du patient, l'algorithme permettrait de proposer non seulement les dimensions et le positionnement de l'implant mais également la faisabilité de l'opération et les potentielles chirurgie pré-implantaires nécessaires.

Une étude de 2021 a ainsi tenté de déterminer le taux de succès d'une IA dans la planification implantaire en utilisant des images CBCT pour l'évaluation de la hauteur et de l'épaisseur osseuse et pour la détection des structures anatomiques adjacentes, en comparaison de l'évaluation manuelle d'un humain.

En se basant sur un modèle de réseaux de neurones convolutifs CNN, 75 imageries comprenant 508 régions implantables ont été analysées. L'étude n'a pas révélé de différences significatives entre IA et humain dans la mesure de la hauteur osseuse dans les secteurs prémolaires mandibulaire et prémolaire maxillaire. Cependant, une différence a été mise en évidence pour la mesure de l'épaisseur osseuse dans la totalité des régions maxillaires et mandibulaires. Concernant la détection des structures, l'IA a montré un taux de succès de 72% pour le canal mandibulaire, 66,4% pour les sinus et fosses nasales et 95,3% pour les zones édentées. Ces valeurs nécessitent cependant d'être comparées avec celles obtenues par un humain afin d'établir une différence de précisions entre les deux avec celles obtenues par un humain (28).

Figure 11 : Rapport de planification pour un cas au maxillaire et à la mandibule à l'aide de l'IA



Source : Kurt et al. « A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images », 2021.

Bien que cette étude n'ait pas révélé d'avantage significatif de l'IA par rapport à l'humain, elle met en évidence le potentiel de faciliter le travail du praticien et d'améliorer la qualité de l'analyse. Pour augmenter la qualité et la fiabilité d'interprétation de l'IA, il est nécessaire de continuer d'incrémenter les images dans la base de données (29).

Un modèle d'IA capable de simuler le positionnement d'un implant avec des dimensions et un axe les plus favorables possibles pour la restauration prothétique est imaginable.

L'une des premières étapes est de proposer les sites implantaire. Ainsi, d'autres applications de l'IA ont été testées dans des tâches plus spécifiques au cours de la planification.

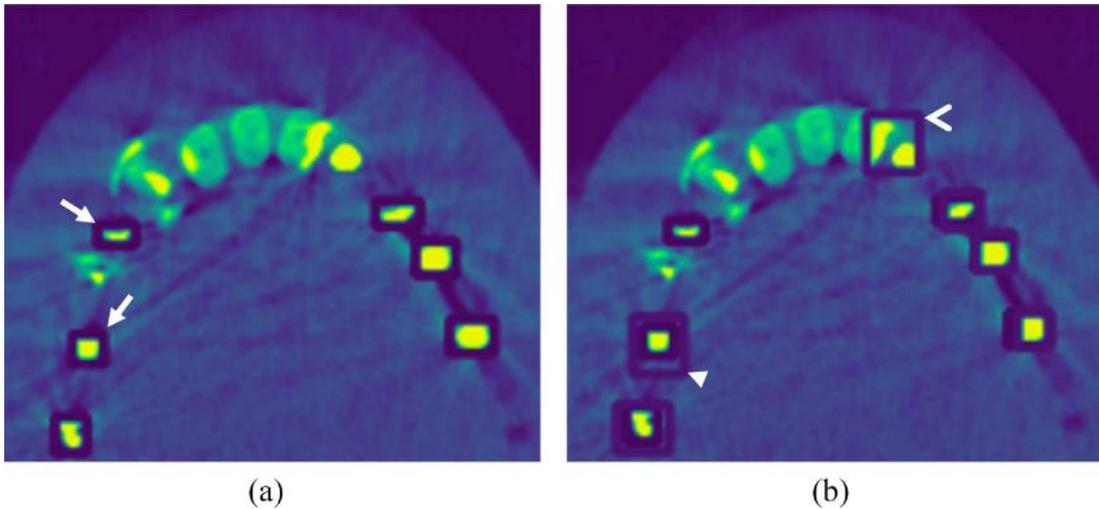
Une étude a ainsi développé et testé un modèle de DP visant à identifier automatiquement la localisation des marqueurs radiographiques de gutta percha (GP) sur un CBCT uniquement avec des coupes axiales. Les chercheurs en ont ressorti un taux de succès de détection des marqueurs de gutta percha de 83% avec un taux de faux positifs de 2,8% et un taux d'échec de 17% (figure 12) (30).

Ces résultats, bien qu'encourageants ne sont pas encore suffisants pour une application clinique dans la pratique quotidienne. Dans cette étude, seules des coupes axiales ont été utilisées ce qui limite les capacités de détection de l'IA.

Il convient d'affiner les algorithmes pour obtenir un taux de succès suffisamment élevé pour permettre une application fiable et donner de véritables avantages par rapport à l'humain. Les avancées de l'IA dans la planification ne se feront pas d'un seul coup mais nécessiteront sûrement dans un premier temps de diviser l'objectif final en plusieurs tâches plus spécifiques.

Figure 12 : Identification des marqueurs de GP sur une coupe axiale

Manuellement (a) et par une IA (b) ; on observe une mauvaise identification au niveau du secteur incisif



Source : Alsomali et al., « Development of a deep learning model for automatic localization of radiographic markers of proposed dental implant site locations », 2022.

Les auteurs des études présentées n'ont pas déclaré de conflits d'intérêt. Cette partie sur la planification implantaire doit cependant faire l'objet d'une vigilance accrue car les produits qui peuvent en résulter, notamment les logiciels informatiques conçus pour cela, sont commercialisés par des sociétés privées à but lucratif.

2.4 Conception, fabrication et amélioration des technologies implantaires

2.4.1 Design, technologies et matériaux actuellement utilisés

La forme de l'implant, la qualité et la structure de sa surface constituent les éléments inhérents à la définition d'une surface. La rugosité facilite non seulement la rétention des cellules ostéogéniques, mais leur permet aussi de migrer vers la surface de l'implant par ostéoconduction. De plus, la rugosité permet une meilleure adhérence des fibres collagènes, augmente la superficie, ce qui aboutit à une plus grande étendue pour la fixation des cellules et améliore la croissance tissulaire et la stabilité mécanique.

Le design d'un implant est déterminé par de nombreux éléments comme son corps (cylindrique, cylindro-conique, conique), ses spires (géométrie et largeur), son diamètre, son apex ou son col (large, évasé, droit, à conicité inversé, à micro-spires) (figure 13).

Figure 13 : Différentes morphologies d'implants



Source : Davarpanah, « Manuel d'implantologie clinique : concepts, intégration des protocoles et esquisses de nouveaux paradigmes », 2012.

En implantologie orale, le gold standard est le titane de grade 4 ou Ti-Cp dit « commercialement pur », constitué d'un alliage de titane composé à plus de 99% de titane et moins de 1% de particules de

carbone, d'oxygène, de fer et d'hydrogène. Bien que présentant un recul clinique de plusieurs décennies avec des taux de succès de l'ordre de 90%, il n'est cependant pas absolument parfait.

De nombreuses recherches ont ainsi pour but d'améliorer les propriétés des biomatériaux utilisés en implantologie, que ce soit en termes de propriétés mécaniques ou biologiques, en étudiant de nouveaux types d'alliages.

Par exemple, le titane de grade 5 constitue un alliage phare dans l'industrie du titane avec de nombreuses utilisations dans le secteur aéronautique, spatial et également médical notamment en orthopédie. Cet alliage s'est ainsi imposé en implantologie dentaire.

Le titane de grade 5 (Ti-6Al-4V) est formé d'un alliage de titane, d'aluminium et de vanadium, permettant de former un réseau cristallin plus complexe, résistant mieux aux contraintes. Les performances mécaniques sont doublées en faveur du TA6V4. Cependant, le réseau cristallin est moins homogène dans le TA6V4, les interfaces impuretés-cristaux sont plus nombreuses. In vitro, l'augmentation de ces interfaces rend le matériau plus sensible à la corrosion par rapport au Ti-Cp

En plus, du titane, de nouveaux biomatériaux potentiels ont fait leur apparition sur le marché notamment les implants en zircone, montrant un avenir prometteur notamment par leurs bonnes propriétés mécaniques, leur longévité et leur intégration esthétique.

2.4.2 Optimisation du design implantaire

Il n'existe pas de design implantaire unique parfait permettant de répondre à toutes les situations cliniques. Ce choix sera ainsi conditionné par les caractéristiques liées au patient notamment les caractéristiques de l'os telles que son épaisseur, sa hauteur et sa qualité. Ce choix s'appuiera donc surtout sur l'expérience du praticien en plus de ses connaissances. Chaque patient étant unique et les designs d'implant disponibles sur le marché étant standardisés, il se peut que dans certaines situations, les possibilités cliniques soient limitées par les disponibilités.

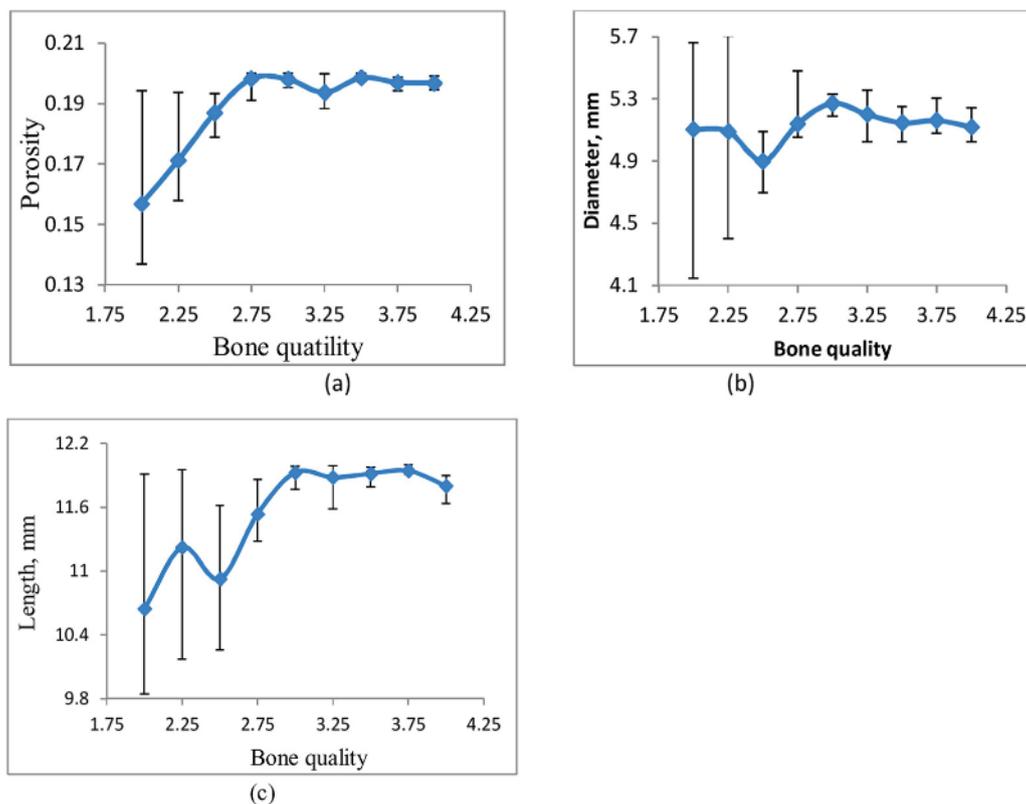
C'est donc dans l'objectif de faciliter ce choix et d'élaborer un design répondant le plus spécifiquement possible à la situation que l'IA peut trouver sa place. Le sujet a fait l'objet d'études, encore peu nombreuses, mais vouées à se multiplier à l'avenir.

Une étude datant de 2018 a été réalisée dans ce cadre. L'objectif était de simuler les microdéformations et le niveau de stress au niveau de l'implant et cela dans le but de déterminer les

solutions optimales en termes de longueur, de diamètre et de porosité du matériau en fonction de la qualité osseuse.

Pour cela, un algorithme génétique basé sur les données de prédiction d'un ANN a été mis en place. Pour la qualité osseuse, les chercheurs se sont basés sur le module de Young de l'os alvéolaire, un module élevé étant associé à un os dur et un module faible associé à un os plus faible. Les résultats (figure 14) ont démontré avec succès le potentiel de la technologie dans le domaine (32).

Figure 14 : Valeurs optimales de porosité(a), de diamètre(b) et de longueur(c) de l'implant dans des conditions osseuses variables



Source : Roy et al, « Design of patient specific dental implant using FE analysis and computational intelligence techniques », 2018.

Une autre étude réalisée en 2022 s'est ainsi concentrée sur l'utilisation d'algorithmes dans l'élaboration du design optimal d'un implant basal en concordance avec les conditions osseuses du patient comme la hauteur et l'épaisseur.

Pour cela, 25 modèles d'implants basaux de paramètres géométriques variables (longueur, diamètre, filetage) ont été modélisés. Ils ont ensuite été implantés virtuellement dans l'os cortical de modèles 3D issues de CBCT de mandibules d'âge, de sexe, de hauteur, d'épaisseur et de densité variable. L'utilisation d'un algorithme ANN basé sur les données des simulations obtenues a ainsi permis de formuler une fonction d'aptitude permettant à un algorithme génétique d'optimiser le design implantaire afin d'obtenir les contraintes et les micro-déformations souhaitées dans l'os péri-implantaire.

Il en résulte ainsi que si la hauteur osseuse mandibulaire du patient est élevée, la longueur de l'implant doit être significativement augmentée sur la partie filetée. Si la largeur osseuse de la mandibule est plus importante, la profondeur du filetage peut être augmentée afin d'obtenir un contact de surface plus important avec l'os, permettant ainsi d'éviter des concentrations de contraintes trop importantes (31).

Les résultats de ces études montrent que l'IA peut contribuer avec succès à la conception d'implants répondant aux niveaux de contraintes souhaités, améliorant ainsi le processus d'ostéointégration pour chaque patient. L'avancée dans le domaine n'est cependant pas encore suffisante pour proposer un système viable, fonctionnel et généralisable, et de nombreuses études sur le sujet sont encore nécessaires.

2.4.3 Amélioration des procédés de fabrication

Il existe plusieurs technologies de fabrication pour les implants dentaires. La plus couramment utilisée est l'usinage CNC (Computer Numerical Control) qui est un processus de fabrication soustractif visant à façonner un implant à partir d'un bloc de titane de façon précise.

Ces dernières années ont vu l'apparition et la démocratisation des techniques de fabrication additive qui présentent plusieurs avantages notamment en termes de personnalisation, de complexité géométrique, de réduction des déchets et de liberté d'innovation et de recherche.

Parmi ces techniques additives, on peut citer :

- La photopolymérisation en cuve qui utilise un photopolymère liquide plongé dans une cuve et qui est solidifié de manière sélective par polymérisation activée par la lumière permettant la réalisation d'objets.

- La projection de matière (Poly-Jet) : C'est un procédé de fabrication additive dans lequel les pièces sont produites par formation de gouttelettes déposées sélectivement.

- L'impression par fusion sur lit de poudre : Ce procédé est une technique de fabrication additive dans lequel l'énergie thermique fait fondre de manière sélective des zones situées sur un lit de poudre.

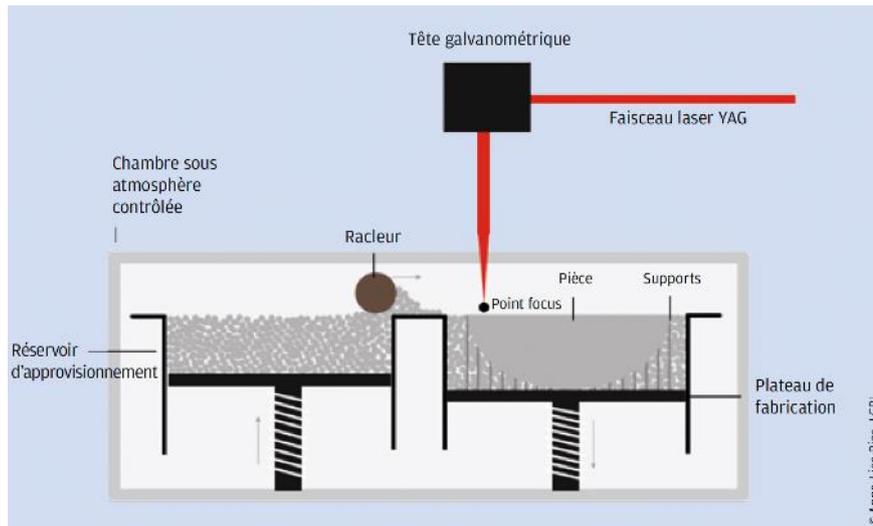
Cependant, il est important de noter que ces procédés sont beaucoup plus complexes et nécessitent donc une importante rigueur en ce qui concerne les paramètres de réglages qui peuvent avoir un impact significatif sur la qualité du produit final.

L'utilisation de l'IA dans l'optimisation de ces paramètres fait l'objet de plus en plus d'études. Cette optimisation promet ainsi non seulement un gain de temps mais également et surtout une potentielle amélioration de la qualité du produit en termes de résistance, de pérennité et de biocompatibilité.

Une étude de 2020 de l'université d'Ulsan en Corée du Sud s'est ainsi concentrée sur l'utilisation d'algorithmes de Deep Learning dans l'optimisation des paramètres de réglages pour la microfusion laser sélective SLM (selective laser melting) de l'alliage de titane Ti-6Al-4V, notamment utilisé en implantologie. Il s'agit d'une technique de fabrication additive appartenant à l'impression par fusion sur lit de poudre.

Ce procédé consiste à agréger par fusion dans une enceinte sous gaz rare les particules d'un lit de poudre métallique à l'aide d'un faisceau laser qui, en balayant la surface, fait fondre simplement la poudre sur un tracé déterminé par un fichier numérique STL couche après couche (Figure 15).

Figure 15 : Principe de fusion de poudre par laser SLM



Source : Rias, laboratoire de conception de produits et innovation, 2014.

Ce procédé étant assez complexe, plusieurs facteurs peuvent exercer une influence sur le produit final et nécessitent donc une attention particulière. Des paramètres tels que la puissance du laser, la vitesse de balayage, l'épaisseur des couches de poudre métallique ou la distance de balayage peuvent ainsi avoir un impact sur les résultats obtenus.

Les chercheurs ont utilisé ces paramètres pour développer un algorithme de type ANN. Pour permettre son entraînement, 2048 impressions 3D réalisées en utilisant des paramètres de valeurs variables ont été réalisées puis soumises à des tests de densité pour obtenir des données expérimentales.

Les résultats ont ainsi permis d'obtenir des paramètres optimaux pour ce procédé et cet alliage (Tableau 3) :

Tableau 3 : Paramètres de réglages optimaux obtenus par ANN

Paramètre	Valeur
Épaisseur de couche (μm)	20
Distance de balayage (μm)	80
Puissance du laser (W)	180
Vitesse de balayage du laser (mm/s)	900

Source: Nguyen et al., « Optimization of selective laser melting process parameters for Ti-6Al-4V alloy manufacturing using deep learning », 2020.

Ces paramètres ont ensuite été testés dans le cadre d'une impression 3D et ont montré des résultats satisfaisants en termes de densité et de porosité, et correspondants aux prédictions réalisées par le modèle développé (33).

Ces recherches montrent donc le potentiel de l'IA dans l'amélioration des techniques de fabrication non seulement en implantologie mais plus généralement dans le domaine médical où les mêmes types de matériaux sont utilisés. D'autres études doivent cependant être menées notamment sur d'autres procédés de fabrication mais également dans le but d'affiner les résultats en se concentrant par exemple spécifiquement sur les implants dentaires et en analysant les relations entre le procédé de fabrication et les propriétés mécaniques et biologiques du produit.

2.4.4 L'IA dans l'étude des biomatériaux

L'étude des biomatériaux constitue donc un domaine essentiel non seulement en dentisterie mais plus généralement en médecine. De nombreux matériaux sont en effet utilisés dans différentes spécialités d'où l'importance de toujours chercher à améliorer leurs propriétés.

Le titane de grade 5 (Ti-6Al-4V) est formé d'un alliage de titane, d'aluminium et de vanadium, permettant de former un réseau cristallin plus complexe, résistant mieux aux contraintes. Les performances mécaniques sont doublées par rapport au titane pur. Cependant, le réseau cristallin est moins homogène dans le TA6V4, les interfaces impuretés-cristaux sont plus nombreuses. In vitro, l'augmentation de ces interfaces rend le matériau plus sensible à la corrosion par rapport au Ti-Cp

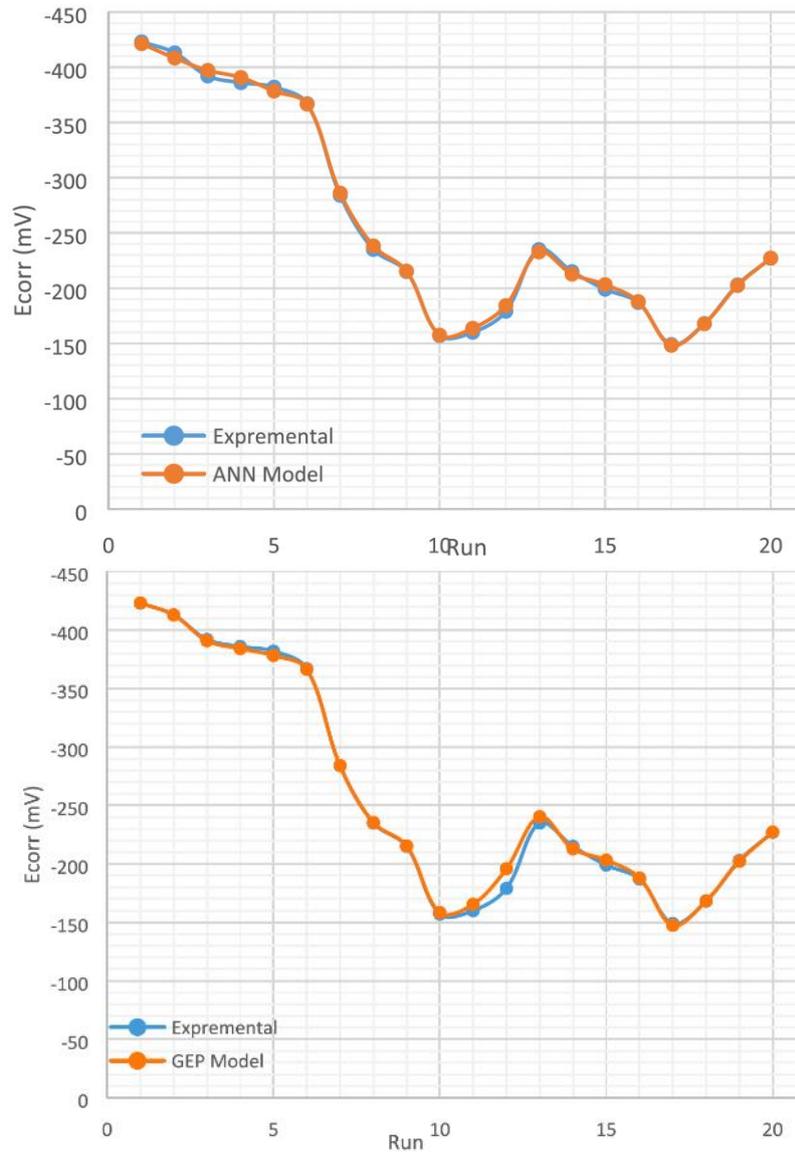
En raison de ses excellentes caractéristiques mécaniques et de sa biocompatibilité, l'alliage Ti-6Al-4V offre de nombreuses applications dans l'industrie médicale. Cependant, une application à long terme de ces alliages peut entraîner une diminution de la résistance à la corrosion. Pour remédier à cela, de nombreuses études ont permis de développer des technologies de revêtement à base de matériaux bio-actifs comme l'hydroxyapatite à appliquer sur les surfaces métalliques permettant de réduire le relargage d'ions, d'améliorer la conduction osseuse et l'ostéo-intégration.

Cependant, afin de s'assurer de l'efficacité de ces procédés, il est nécessaire d'analyser et de modéliser la résistance à la corrosion du matériau, ce qui ne constitue pas une tâche simple. C'est dans cet objectif qu'une étude de 2022 a permis de d'évaluer les performances de résistance à la corrosion d'un alliage de Ti-6Al-4V avec un revêtement d'hydroxyapatite.

Pour cela, des modèles de réseaux de neurones artificiels ANN ainsi que des algorithmes génétiques GEP ont été utilisés dans le but de prédire l'évolution du potentiel de corrosion de l'alliage. Ces résultats ont été comparés avec des valeurs de référence provenant d'études expérimentales ainsi que de l'application d'une méthodologie des surfaces de réponse MSR (approche statistique utilisée pour analyser et optimiser les relations entre des variables).

Pour quantifier ce potentiel de corrosion, les chercheurs se sont basés sur la mesure du potentiel E_{corr} dans le temps. Il représente la mesure du potentiel électrique à la surface d'un matériau exposé à un environnement corrosif. Un matériau avec un potentiel E_{corr} plus positif (plus élevé) est considéré comme plus résistant à la corrosion, car il a tendance à se polariser davantage vers une région passive et à former une couche protectrice qui prévient la corrosion. En revanche, un potentiel E_{corr} plus négatif (plus bas) indique une plus grande susceptibilité à la corrosion, car le matériau a tendance à se corroder plus rapidement.

Figure 16 : Valeurs expérimentales comparées aux valeurs de l'ANN (en haut) et du GEP (en bas)



Source: Kazemi et al., « Investigating the Corrosion Performance of Ti-6Al-4V Biomaterial Alloy with Hydroxyapatite Coating by Artificial Neural Network », 2022.

On observe ici que les résultats de la technique ANN étaient en bonne corrélation avec les valeurs expérimentales d' E_{corr} , ce qui indique que ce modèle est légèrement meilleur que les modèles GEP et MSR. Enfin, les résultats ont démontré que la technique ANN est un outil approprié et robuste pour la modélisation quantitative de la résistance à la corrosion et qu'elle peut être appliquée à diverses applications d'ingénierie de surface (34).

On observe ici le potentiel de l'IA dans l'optimisation des propriétés des biomatériaux pour la conception de nouveaux alliages. Il est encore cependant nécessaire de réaliser d'autres recherches afin de confirmer ces résultats mais également de les affiner pour permettre une application clinique fiable.

2.5 Phase chirurgicale et guidage

2.5.1 Techniques actuelles en chirurgie implantaire guidée

Ces dernières années, l'amélioration des procédures en implantologie, des techniques d'imageries et la révolution du numérique ont permis l'apparition de l'implantologie assistée par ordinateur ou implantologie guidée. Cette technique vise à poser un implant à l'aide d'un guide réalisé numériquement.

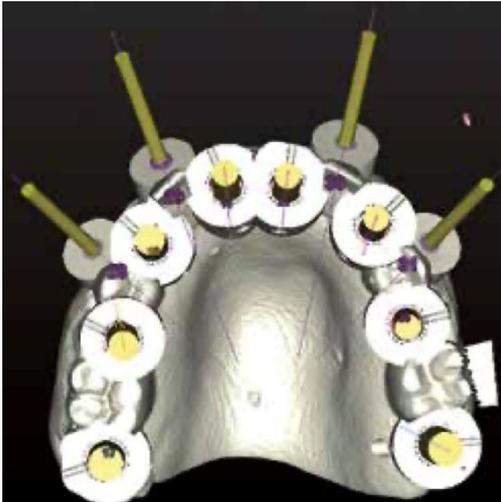
Il existe différents types de guides envisageables selon le type d'appui que l'on souhaite à savoir osseux, muqueux ou dentaire et aussi selon la technique chirurgicale réalisée avec des guides de pointage pour le passage des forêts uniquement ou des guides de chirurgie complètement guidés.

La chirurgie guidée présente de nombreux avantages notamment en termes de précision. Elle permet de respecter le volume osseux résiduel tout en anticipant les obstacles anatomiques et en restant en adéquation avec l'axe prothétique. Le temps de l'intervention se voit également raccourci avec un acte reproductible et moins invasif. Cela garantit également un meilleur contrôle des suites opératoires avec une réduction des risques hémorragiques peropératoires et une meilleure cicatrisation.

Cela bénéficie non seulement au patient, mais aussi au praticien en réduisant le stress du chirurgien et en sécurisant la procédure.

Malgré cette aide non négligeable, la chirurgie implantaire reste quand même un acte nécessitant au praticien d'intégrer tous les fondamentaux en implantologie et en anatomie, reste très dépendante de son expérience et ne garantit pas le succès de la pose à 100%. L'utilisation de ces guides est également plus complexe dans certains cas comme aux secteurs postérieurs du fait de l'espace vertical disponible réduit.

Figure 17 : Image virtuelle d'un guide à appui muqueux (gauche) et stabilisé en bouche avec forages réalisés (droite)



Source : Attias et al., « La chirurgie guidée », 2020.

2.5.2 IA et chirurgie guidée : Le robot YOMI

La chirurgie dentaire assistée par robot combine les avantages à la fois des contraintes physiques des guides statiques et de la flexibilité de la navigation dynamique basée sur l'imagerie. Cette technique repose cependant sur des technologies très complexes à maîtriser et encore plus à appliquer cliniquement sur des patients, sans parler de la validation au niveau législatif qui peut poser problème.

Yomi, un dispositif chirurgical assisté par robot développé par la start-up de santé Neocis, a obtenu l'autorisation de la Federal Drug Administration (FDA) pour les procédures générales d'implants dentaires en 2016. Il s'agit ici du premier et unique système de ce type approuvé par une autorité nationale. Cette autorisation s'est élargie pour les procédures d'implants dentaires à arcade complète depuis l'année 2020.

Ce système offre un guidage physique avec retour haptique, ainsi qu'un guidage visuel et auditif au chirurgien pendant l'intervention.

Dans un premier temps, la planification se fait de manière conventionnelle en utilisant un CBCT et en déterminant la position voulue de l'implant. Au moment de l'intervention, afin de pouvoir situer la bouche du patient dans l'espace, une plaque en résine est fixée et vissée à l'os qui sera ensuite relié au robot à l'aide d'un bras (non motorisé) détectant les mouvements du patient et ainsi pouvant suivre la position de sa bouche.

Figure 18 : Le robot Yomi (A) ; en cours d'intervention (B)



Source: Bolding et al, « Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches », 2021.

Une fois la préparation terminée, le praticien utilise un contre-angle soutenu par un bras articulé motorisé pour effectuer la chirurgie, offrant un guidage physique avec retour haptique sans altérer les sensations du praticien ni restreindre ses mouvements : c'est le dentiste qui reste maître de l'intervention.

Ainsi, si l'outil se trouve à l'emplacement et à l'orientation corrects, le robot ne fournit aucune résistance physique. Cependant, si l'outil s'écarte de quelque manière que ce soit, le robot contraint l'axe de l'outil à l'emplacement et à l'orientation prévus. La profondeur prévue est également planifiée de la même manière.

Lorsque l'instrument atteint la profondeur prévue, le bras robotique arrête l'outil et n'autorise pas de forage supplémentaire. Le chirurgien conserve la possibilité de modifier le plan de positionnement de l'implant à tout moment pendant la procédure chirurgicale.

Depuis 2016, plus de 10 000 implants ont déjà été posés à l'aide de ce système offrant ainsi un certain recul clinique concernant l'efficacité et la fiabilité de la procédure. Des études ont également été

menées pour évaluer le niveau de précision de ce type de guidage et montre bien que la procédure est sûre et précise. Bien que d'autres études sur un plus long terme soient nécessaires, il semble que le système apporte un véritable avantage par rapport aux techniques conventionnelles en termes de précision et de sécurité (36).

Ce système, bien que reposant beaucoup sur des technologies robotiques de pointe, s'appuie également sur des algorithmes d'intelligence artificielle sans lesquels cette technique ne serait pas réalisable. Ceux-ci permettent ainsi un traitement de l'information en temps réel et sont capables de s'adapter à de nombreuses situations.

2.5.3 Vers une chirurgie complètement autonome ?

La démocratisation de la chirurgie implantaire guidée par robot nous incite naturellement à nous projeter sur une chirurgie implantaire réalisée de façon totalement autonome en réduisant au maximum voire en supprimant toute intervention humaine lors de l'opération.

Cette technologie a déjà fait l'objet de certaines études dans le cadre de tests cliniques mais reste toutefois encore limitée au stade expérimental.

Une étude de 2022 réalisée à Guangzhou, en Chine, rapporte ainsi le cas clinique d'un patient sur lequel a été réalisée la mise en charge immédiate d'une prothèse complète à la suite d'une chirurgie implantaire réalisée de façon autonome.

Pour cela, les chercheurs ont utilisé un robot développé en Chine et comprenant cette fois-ci un bras robotisé actif et apte à manœuvrer des instruments de lui-même, ceci combiné avec un traqueur optique pour suivre la position du patient. Les étapes préopératoires sont globalement similaires à celles réalisées pour la chirurgie guidée avec une planification sur CBCT réalisée en amont et transmise au robot.

Sous la surveillance des chercheurs et avec l'accord du patient, le robot a ainsi réalisé de façon totalement autonome la chirurgie en technique « flapless » en respectant les paramètres fixés lors de la planification. Après le forage de chaque site, l'implant était automatiquement placé. Une prothèse complète en résine a ensuite été mise en place. Suite à cela, l'axe et la position des implants ont été analysés pour y déceler les potentielles imprécisions.

Figure 19 : Le robot utilisé pour la chirurgie autonome (en haut) ; en cours d'intervention sans aide humaine (en bas)

Source : Yang et al., « Autonomous robotic surgery for immediately loaded implant-supported maxillary full-



arch prosthesis: a case report », 2022.

Les résultats, bien que présentant de légères imprécisions, ont ainsi démontré la faisabilité d'une chirurgie complètement autonome permettant ainsi d'ouvrir la porte à de nombreuses applications possibles dans le futur (37).

La recherche sur les robots autonomes pour la pose d'implants nécessite une gestion attentive des conflits d'intérêts pour garantir la qualité, la fiabilité et l'objectivité des résultats, tout en préservant la sécurité et le bien-être des patients. Les chercheurs déclarent ici n'avoir aucun conflit d'intérêts.

Il faut bien évidemment préciser que, comme les chercheurs le reconnaissent, l'application de ce concept n'en est qu'à ses balbutiements et de nombreuses avancées technologiques associées à des études sur le sujet ainsi qu'un certain recul clinique seront nécessaires afin de rendre ce procédé fiable et de le généraliser. Cette notion d'autonomie totale pose bien sûr de grosses questions au niveau éthique notamment en termes de responsabilité.

2.6 Réalisation prothétique et maintenance

2.6.1 Identification du système implantaire

En implantologie, un praticien travaille en général avec un nombre limité de système d'implants selon ses préférences et les disponibilités. Il existe cependant dans le monde plus de 300 marques d'implants regroupant plus de 3500 modèles dans plus de 5000 catalogues.

Il peut donc arriver qu'un patient se présente avec un implant dont les références sont inconnues. Or, pour pouvoir démarrer la réalisation d'une prothèse supra-implantaire quelle qu'elle soit, il est indispensable de connaître le modèle d'implant qui se présente à nous afin de pouvoir le communiquer au prothésiste et commander ainsi des pièces compatibles.

L'identification peut se faire par le praticien lui-même si celui-ci parvient à reconnaître le modèle notamment à l'aide d'une radiographie rétro-alvéolaire et également cliniquement avec l'observation de la partie visible en bouche.

Il existe également des aides en ligne qui visent à assister le praticien dans la reconnaissance en décrivant les caractéristiques de l'implant pour tenter de l'identifier parmi une grande liste ou de directement envoyer les vues cliniques et radiographiques à des experts qui pourront analyser et identifier le modèle.

Ces méthodes ne sont cependant pas toujours fiables car elles requièrent une certaine expérience et, compte tenu de la quantité de modèles disponibles, il est difficile de pouvoir identifier un système avec un taux de réussite important.

C'est dans ce domaine que l'IA s'est très rapidement développée ces dernières années. De nombreuses études ont ainsi été réalisées concernant l'utilisation d'algorithmes d'apprentissage dans la reconnaissance d'implants dentaires à partir d'une radiographie. En se basant sur un catalogue regroupant un grand nombre de modèles il est ainsi possible d'identifier la marque et le système utilisé avec un bon taux de réussite.

Les études portant sur le sujet ont ainsi révélé un taux de succès compris entre 93% et 99%, les résultats variant en fonction de l'efficacité de l'algorithme et de la taille de la base de données utilisée

(38,39,40). Ces résultats montrent que l'utilisation de l'IA dans ce domaine présente déjà une efficacité suffisante pour une application clinique actuelle.

En France, la technologie est déjà assez répandue et utilisée. La startup Spotimplant, l'une des premières dans le domaine, a développé et commercialisé un outil d'identification basé sur des algorithmes de Deep Learning à partir d'une radiographie et de quelques données personnelles (année de la pose, pays, etc ...).

Figure 20 : Rapport d'identification sur Spotimplant à partir d'une radiographie

Source : Spotimplant, « Rapport d'identification d'implant dentaire »

Le rapport obtenu révèle ainsi les caractéristiques de l'implant et les modèles correspondant les plus probables. Cette technologie permet ainsi de réduire les coûts et les délais d'identification tout en

Identification Report

XiVe S (Dentsply) 96.93%

Estimated Features (Confidence score)

Head

- Level: Bone Level (99.82%)
- Connection Type: Internal (99.93%)
- Head Shape: Straight (98.67%)
- Head Microthreads: No (83.37%)

Technical Features

- Level: Bone Level
- Connection Type: Internal
- Connection Shape: Hexagon
- Head Shape: Straight
- Head Microthreads: No
- Body Shape: Tapered
- Body Threads: Reverse Buttress
- Apex Shape: Dome
- Apex Hole: No Hole
- Apex Grooves: Yes

Dimensions

Length \ Diameter	3.00mm	3.40mm	3.80mm	4.50mm	5.50mm
8.00mm			26-2440	26-2450	26-2460
9.50mm		26-2431	26-2441	26-2451	26-2461
11.00mm	26-2422	26-2432	26-2442	26-2452	26-2462
13.00mm	26-0123	26-2433	26-2443	26-145399	26-146399
15.00mm	26-2425	26-2435	26-2445	26-2455	26-2465
18.00mm		26-2438	26-2448	26-2458	

augmentant le taux de réussite.

2.6.2 Conception prothétique

Ces dernières années, l'utilisation du numérique en prothèse avec les méthodes de conception et fabrication assistées par ordinateur (CFAO) s'est nettement répandue dans la pratique quotidienne du

fait des nombreux avantages qu'elle apporte notamment la réduction des étapes de la chaîne prothétique, des risques d'erreurs et l'amélioration de la précision des restaurations.

L'utilisation de supports numérique, contrairement aux empreintes physiques conventionnelles, permet ainsi d'envisager des applications potentielles de l'IA dans le domaine afin d'améliorer la précision des restaurations prothétiques et de proposer des soins toujours plus personnalisés.

Plusieurs études ont déjà été réalisées sur les applications de l'IA en prothèse fixe ou amovible et certaines sociétés ont déjà développé leur propre logiciel d'aide à la conception. C'est le cas par exemple de LUCY de la société Biotech Dental dévoilé en 2018, un logiciel de modélisation semi-automatisée qui promet une conception quasi-instantanée de tous types de prothèses et ce, de façon personnalisée à partir d'une empreinte optique du patient.

Cependant, étonnamment, encore très peu d'études ont porté sur une application de l'IA en prothèse supra-implantaire mais on peut parier que leur nombre augmentera dans les années à venir. Bien qu'étant différentes, les prothèses supra-dentaires présentent des points communs avec les prothèses supra-implantaires et il est ainsi possible d'imaginer une transposition des applications de l'IA de l'une à l'autre.

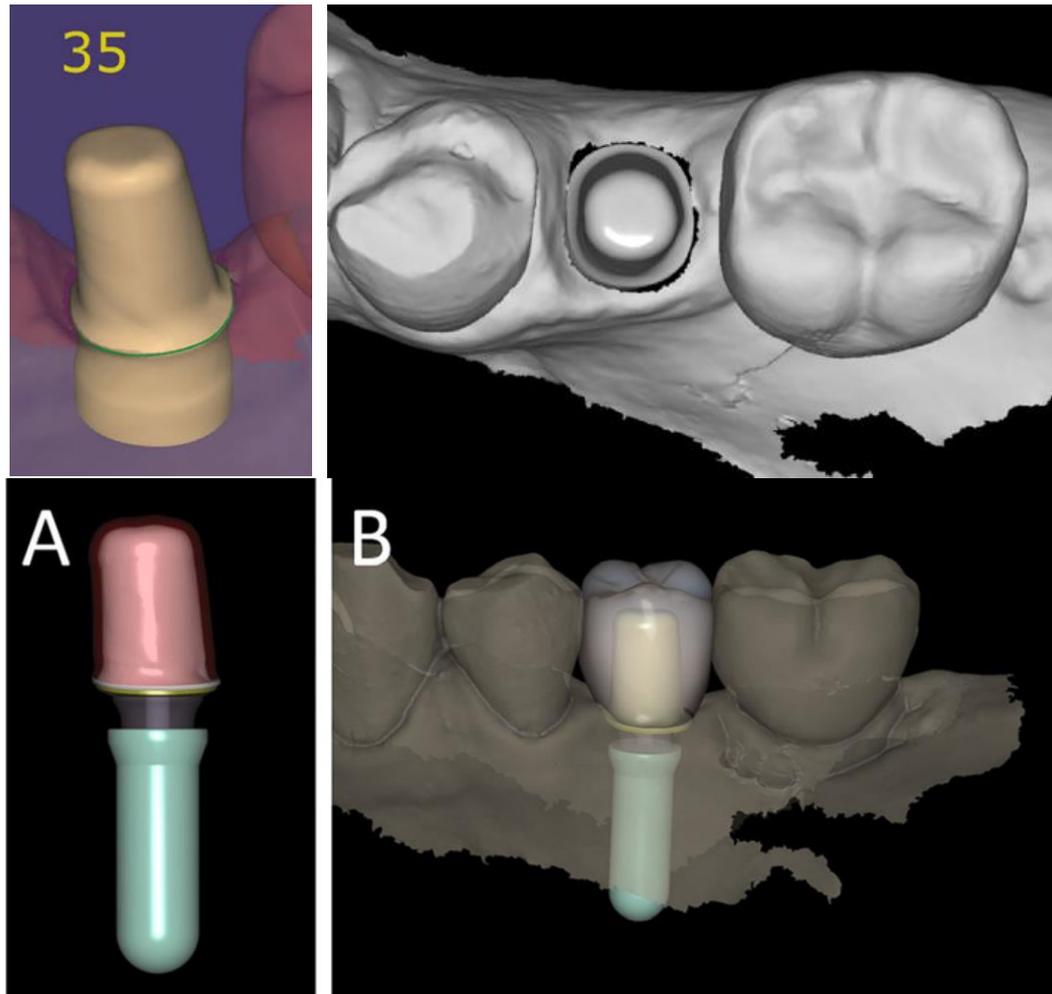
La prothèse supra implantaire présente cependant certaines spécificités qui peuvent rendre la réalisation prothétique plus sensible.

Une étude de 2020 présente ainsi un protocole qui vise à utiliser l'intelligence artificielle pour la fabrication de couronne supra-implantaire scellée monolithique en zircone. Les chercheurs ont ainsi mis en place un pilier implantaire par-dessus lequel une couronne provisoire guide la gencive marginale pour obtenir un profil d'émergence satisfaisant. Une empreinte optique du pilier et du profil d'émergence de la provisoire a été réalisée. Le pilier et la couronne provisoire ont été réalisés par conception assistée par ordinateur CAO.

Un logiciel basé sur des algorithmes d'intelligence artificielle a ensuite conçu une couronne définitive en réalisant notamment une détection automatique de la ligne marginale. Ce processus a été appliqué sur 90 patients et 106 implants. Le suivi des patients a permis de mettre en évidence un taux de survie et de succès très satisfaisants (respectivement 99% et 91%). L'évaluation clinique des principaux critères de qualité d'une restauration prothétique a été réalisée avec une adaptation marginale, des contacts interproximaux, occlusaux et une intégration esthétique de qualité (41).

L'utilisation de l'IA permet ainsi d'envisager non seulement une amélioration de la qualité de conception des prothèses mais également une réduction de la charge de travail pour le dentiste et le prothésiste à travers une automatisation de certaines tâches dans la chaîne de réalisation prothétique.

Figure 21 : Détection automatique de la ligne marginale et conception assistée du pilier (gauche) ;
conception assistée de la couronne définitive (droite)



Source : Lerner et al., « Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics : a retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients », 2020.

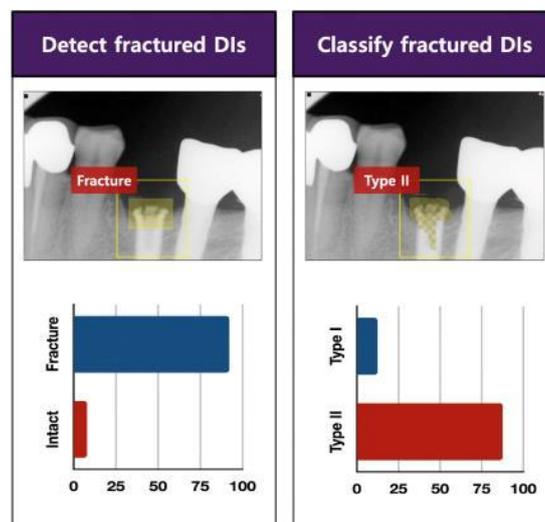
2.6.3 Suivi et maintenance

A la suite d'une réhabilitation implantaire, un suivi sur le long-terme est absolument indispensable. En effet, il existe toujours des risques de complications. Ces complications peuvent être infectieuses

comme les mucosites, péri-implantites ou lésions péri-apicale implantaire mais peuvent également être, dans certains cas, mécaniques allant du simple dévissage accidentel à la fracture complète de l'implant ou de la vis de pilier. Certaines études se sont ainsi penchées sur l'application de l'IA dans la détection précoce de certaines de ces complications. En effet, une complication non-détectée peut compromettre les possibilités de réparation sur le long-terme notamment par une alvéolyse importante impactant le potentiel remplacement de l'implant.

Une étude de 2021 a ainsi tenté de déterminer l'efficacité de modèles de Deep Learning dans la détection de fractures d'implants dentaire à partir de radiographies panoramiques et rétro-alvéolaires. Les chercheurs ont entraîné les algorithmes sur une base de 445 implants dont 194 fracturés. Les résultats ont ainsi démontré une efficacité satisfaisante des modèles utilisés dans la détection des fractures mais également dans leur classification. En effet, en plus de les détecter, les algorithmes sont parvenus à classer de façon autonome les fractures en 2 types : Type I (n'allant pas au-delà de la partie crestale) et type II (dépassant la partie crestale) (42).

Figure 22 : Détection et classification automatique d'une fracture implantaire



Source : Lee et al., « Artificial intelligence in fractured dental implant detection and classification : evaluation using dataset from two dental hospitals », 2021.

2.7 Que doit-on réellement en attendre ?

Comme nous venons de le voir, l'IA fait l'objet de nombreuses études en implantologie sur de multiples applications potentielles. Pour résumer, les études présentées ici portaient sur :

- Dépistage des patients à risque
- Pronostic dentaire et décision d'implantation
- Pronostic implantaire
- Planification
- Optimisation du design, des procédés de fabrication et des biomatériaux
- Chirurgie guidée, naviguée ou robot autonome
- Réhabilitation prothétique : identification, conception et suivi

Il est cependant judicieux de se demander pour quelles problématiques l'IA présente une réelle utilité sur le court terme et quels nouveaux axes développer afin d'apporter rapidement des améliorations concrètes et utiles à la pratique clinique.

Les études déjà abordées nous ont montré de belles perspectives d'applications de l'IA dans le domaine comme l'aide à la planification ou l'identification implantaire. Certaines problématiques n'ont cependant pas encore fait l'objet d'études alors qu'elles permettraient de répondre à des besoins tout aussi importants.

Voici donc des idées potentielles d'axes sur lesquelles il serait intéressant de se pencher dans de futures études :

- Amélioration du pré-traitement des images radiographiques du CBCT afin d'augmenter la précision de l'image et réduire le risque d'erreur de segmentation qui a un impact lors de la planification et de la réalisation du guide chirurgical.
- Amélioration de la précision d'impression des guides chirurgicaux.
- Applications dans l'éducation et la formation à l'implantologie à l'aide de simulations 3D ou de casque de réalité virtuelle ou augmentée.
- Aide à la mise en place de recommandations pour aider les praticiens à prendre des décisions éclairées lors de la planification et de l'exécution des procédures.
- Applications dans les chirurgies pré-implantaire (sinus lift, greffe osseuse, greffe gingivale ...) en permettant d'établir un pronostic, en aidant sur le choix du greffon, en privilégiant une technique particulière selon le cas clinique. Comme pour l'implant, l'IA pourrait aussi contribuer à l'étude des biomatériaux utilisés.
- Evaluation des risques chirurgicaux en fonction du contexte médical.
- Aide au choix du type de connexion et de restauration la plus adaptée à une situation clinique notamment pour des cas plus complexes comme l'édenté complet.

Des recherches dans d'autres spécialités comme l'orthopédie dento-faciale ou l'occlusodontie pourraient également avoir un impact en réhabilitation implantaire avec par exemple l'optimisation des analyses céphalométriques ou l'évaluation des forces masticatoires selon le morphotype, le sexe ou l'âge du patient pour une meilleure analyse occlusale.

A noter que de nombreuses études sont en cours de préparation et de nouvelles sortent tous les mois ; il est donc possible que certaines abordent un des points cités ici.

3 : Faut-il en avoir peur ?

3.1 Réflexions sur les enjeux éthiques et juridiques

Dès son émergence dans les années 50, l'intelligence artificielle a tout de suite suscité plusieurs interrogations morales. L'accélération de son développement ces dernières années a cependant soulevé de nombreux dilemmes éthiques mais également juridiques auxquels la société n'était pas encore préparée et qui nécessitent absolument d'être encadrés.

3.1.1 Protection et utilisation des données

Le règlement général sur la protection des données personnelles (RGPD) du 27 avril 2016, applicable depuis le 25 mai 2018, est le premier texte réglementaire définissant les données personnelles de santé comme étant « les données à caractère personnel relatives à la santé physique ou mentale d'une personne physique, y compris la prestation de services de soins de santé, qui révèlent des informations sur l'état de santé de cette personne » (43). Il est donc essentiel de rappeler que la protection des données personnelles est indispensable au respect de la dignité même de la personne physique.

Comme on l'a vu pour la grande majorité des études, l'apprentissage des algorithmes se fait à travers une base de données personnelles et médicales de nombreux patients. Or, la collecte, le traitement et la conservation de ces données ne confère en aucun cas un droit de propriété de celles-ci à la structure responsable. Dans la plupart des cas, le traitement de données personnelles à des fins de recherche est règlementé à travers un processus d'anonymisation permettant ainsi de ne pas impliquer de données identifiantes de santé. Dans ce cas-là, la réglementation sur les données personnelles ne s'applique pas et la RGPD n'est pas opposable à ce type d'opérations.

Ce processus soulève néanmoins plusieurs questions notamment en ce qui concerne l'efficacité de l'anonymisation de certaines données. Le cas des images médicales présente par exemple un certain flou juridique quant à sa véritable anonymisation ; des données comme celles-ci pourraient potentiellement être réidentifiées à travers l'analyse de toutes les données possédées dans un but commercial ou malveillant (44).

3.1.2 Le problème de la responsabilité

L'utilisation de l'IA en dentisterie tend à apporter une autonomie de plus en plus importante à la machine. Ce principe d'autonomie pose ainsi naturellement la question de la responsabilité ; comme l'a demandé l'OMS : « Les médecins doivent-ils être tenus pour responsables s'ils suivent la suggestion d'une technologie d'IA qui entraîne une erreur médicale ou s'ils ignorent une suggestion qui aurait permis d'éviter la mortalité ou la morbidité ? »

Cette question constitue un point déterminant notamment pour la démocratisation de l'utilisation d'IA. En effet, si les lois encadrant la pratique sont trop sévères et pénalisantes sur ce sujet, les praticiens ne se risqueront pas à utiliser de tels systèmes ou, du moins, ne les utiliseront que pour valider leur jugement, or l'IA a aussi pour but de démultiplier le raisonnement humain et pas simplement de le confirmer.

Ces dernières années, des textes de loi sont apparus dans le but de commencer à encadrer ces pratiques. Le rapport de la loi de Bioéthique du 15 janvier 2019 proposait de « maintenir le principe d'une responsabilité du médecin qui, en l'absence de défaut établi de l'algorithme, ne peut être engagée qu'en cas de faute de sa part ». De plus, le rapport ajoute qu'« une faute ne peut être établie du seul fait que le praticien n'aurait pas suivi les recommandations d'un algorithme, quand bien même celles-ci se révéleraient exactes ». Cela implique donc qu'un professionnel de santé qui aurait suivi aveuglément la décision d'un système d'IA pourrait être accusé de négligence alors qu'il n'y aurait pas de faute dans le cas où il décide de ne pas suivre les recommandations du système (45).

Il n'existe cependant pas encore de texte juridique apportant une réponse claire et précise mais on constate une certaine volonté de conserver le plus possible l'autonomie du praticien et donc sa responsabilité afin de maintenir une relation de soins saine. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) déclare ainsi que la prise de décision ne doit pas revenir au logiciel. Il est ainsi nécessaire de mettre en place des pratiques concrètes garantissant qu'un clinicien « puisse passer outre les décisions prises par les systèmes d'IA et que l'autonomie des machines puisse être limitée et rendue intrinsèquement réversible ».

La déclaration de Montréal stipule ainsi que « Les systèmes d'IA ne devraient pas être mis en œuvre pour remplacer des personnes sur des tâches qui requièrent une relation humaine de qualité, mais devraient être développés pour faciliter cette relation » et qu'ils doivent « prendre en considération l'importance pour les patients des relations avec le personnel médical et la famille » (46).

3.1.3 Recherche et conflits d'intérêts

On parle de conflit d'intérêts dans la recherche lorsque des facteurs financiers ou d'autres facteurs personnels affectent ou semblent affecter le jugement professionnel d'un chercheur dans l'exécution ou le compte rendu de sa recherche. C'est pour cette raison qu'il est généralement demandé aux chercheurs de déclarer tout potentiel conflit d'intérêts potentiels avant de publier les résultats d'une étude.

Les conflits d'intérêts peuvent entacher la perception qu'ont les gens des chercheurs et de l'industrie scientifique. Lorsque d'importantes sommes d'argent sont en jeu, il peut être difficile de convaincre le public, les législateurs, le système juridique et même les collègues que les conclusions n'ont pas été influencées par un gain personnel.

L'IA en médecine est un domaine en pleine expansion qui suscite un intérêt croissant de la part des entreprises pharmaceutiques, des fabricants d'appareils médicaux et des entreprises technologiques. Ces acteurs peuvent avoir des intérêts financiers dans les résultats de la recherche, ce qui peut influencer les décisions scientifiques, les méthodes de recherche ou même la publication des résultats.

On pourrait ainsi voir apparaître des biais de publication avec des chercheurs incités à publier des résultats favorables à leurs intérêts entraînant une situation où les résultats positifs sont davantage mis en avant, tandis que les résultats négatifs ou moins favorables sont moins susceptibles d'être publiés ou d'attirer l'attention nécessaire.

On peut également imaginer des biais dans la conception même de l'étude. Par exemple, une entreprise ayant développé une technologie d'IA spécifique pourrait concevoir une étude qui favorise cette technologie, en la comparant à des méthodes moins avancées ou en sélectionnant des groupes de patients qui seraient plus susceptibles de montrer des bénéfices avec la technologie en question et donc conduire à une présentation biaisée de ses avantages.

Il est essentiel de reconnaître et de gérer de manière appropriée les conflits d'intérêts dans la recherche sur l'IA en médecine afin de préserver l'intégrité scientifique, de promouvoir des pratiques fondées sur des preuves et de garantir des soins de haute qualité pour les patients. Cela nécessite des politiques rigoureuses de divulgation des conflits d'intérêts, des mécanismes de relecture par les pairs et une surveillance étroite de la conduite de la recherche et de la publication des résultats.

3.2 Impacts sociaux et économiques

3.2.1 Inégalité d'accès à des soins de qualité

L'IA a le potentiel de réduire les inégalités géographiques d'accès aux soins notamment par des systèmes de prédiction et en facilitant la prise en charge. Le déploiement de ces technologies ne sera cependant pas universel ni immédiat. Des technologies émergentes comme celles-ci peuvent mettre plusieurs années à se mettre en place ce qui impose inévitablement une hiérarchisation des priorités et notamment des zones de déploiement. Cette mise en place hétérogène risque ainsi de provoquer des déséquilibres géographiques dans l'efficacité des systèmes de santé ainsi que des inégalités d'accès à des soins de qualité.

Comme le note un rapport commandé par le Comité directeur pour les droits de l'Homme dans les domaines de la biomédecine et de la santé (CDBIO), « ces déséquilibres peuvent aller dans les deux sens : si les systèmes d'IA améliorent la qualité des soins, en fournissant un diagnostic plus précis ou efficace, en élargissant l'accès aux soins ou en développant de nouvelles interventions pharmaceutiques et thérapeutiques, les patients traités dans les régions ou les établissements de santé qui feront partie des pionniers de l'IA bénéficieront de ces systèmes avant les autres. Les systèmes d'IA peuvent également être utilisés pour libérer les cliniciens des tâches subalternes qui demandent beaucoup de travail, comme la saisie de données, et leur permettre ainsi de consacrer plus de temps aux patients qu'auparavant » (47).

De plus, la mise sur le marché de ces technologies aura aussi un coût financier qui se répercutera donc sur le prix des soins. Bien que ces coûts aient tendance à se réduire avec le temps, il est possible que certains soins considérés comme de meilleure qualité car faisant intervenir l'IA ne soit limité qu'à une certaine catégorie de patient, en fonction de leur capacité financière. Dans le cadre de l'implantologie, on peut par exemple imaginer que l'accès à certains types d'implants personnalisés ou conçus par des techniques d'IA, et donc forcément plus cher, ne sera limité qu'à ceux pouvant se le permettre financièrement.

3.2.2 Évolution de la relation praticien-patient

Dans le domaine médical, la relation praticien-patient constitue depuis toujours un élément essentiel dans la prise en charge. Cette relation et les soins qui en résultent reposent essentiellement sur une évaluation de l'état du patient par le médecin en prenant en compte son environnement et ses

antécédents. L'écoute, l'empathie, la confiance et le consentement sont des composantes essentielles de celle-ci.

En dentisterie, cette relation présente une importance particulière du fait des nombreuses craintes que peuvent avoir certains patients envers le dentiste notamment la peur de la douleur ou de la perte d'intimité qu'impose les soins dans ce domaine. L'établissement d'une relation saine et de confiance est donc particulièrement importante dans ce métier.

Ce type de relation est difficilement reproduite dans les soins facilités par les technologies. Les représentations des données du patient se limitent à des caractéristiques chiffrées, ce qui pose des problèmes lorsqu'elles deviennent la base des évaluations cliniques. Ces représentations peuvent être construites par des technologies de télésurveillance ou d'autres données qui ne sont pas recueillies lors de rencontres en face à face entre humains. Bien que considérées comme une mesure "objective" de la santé du patient, elles réduisent l'importance des facteurs contextuels et de la vision du patient en tant que personne sociale. Les représentations des données peuvent créer une illusion de certitude en considérant les données de suivi "objectives" comme une représentation fidèle de la situation du patient, tout en négligeant le contexte interpersonnel et les connaissances tacites (47).

L'IA peut ainsi permettre une amélioration considérable en termes de qualité des soins ; cependant, il est important de noter que l'IA ne doit pas remplacer la relation humaine et empathique entre le praticien et le patient. Malgré les avantages potentiels de l'IA, il est essentiel de maintenir une communication ouverte, une compréhension des besoins émotionnels des patients et une écoute active. Cela constituera sûrement un défi pour les prochaines années notamment pour la formation des futures générations de praticiens qui seront confrontés à cette problématique dès le début de leurs études.

3.2.3 Conséquences économiques

En plus du potentiel de l'IA dans l'amélioration de la qualité des soins, celle-ci pourrait à terme présenter des avantages économiques que ce soit pour le patient ou le praticien. Comme on l'a décrit, certains systèmes comme l'analyse des données radiographiques ou la planification du traitement pourraient réduire le temps nécessaire pour effectuer ces tâches et ainsi augmenter le nombre de procédures pouvant être réalisées et donc optimiser l'utilisation des ressources. En conséquence, cela peut améliorer la rentabilité globale d'un cabinet.

L'utilisation de systèmes d'IA a également le potentiel d'apporter de nombreuses améliorations dans la conception des prothèses qui représente une partie importante du coût final du traitement. Des techniques de conception automatique permettraient ainsi d'accélérer non seulement le processus de fabrication mais également de multiplier le nombre de cas réalisables par un prothésiste. Un tel système suffisamment perfectionné et fiable pourrait à terme ne nécessiter qu'une simple supervision avec un seul prothésiste pour un nombre de cas très important voir être totalement autonome. Cela permettrait ainsi de réduire considérablement les délais de livraisons ainsi que les coûts liés à la conception.

Cette réduction de coûts, à la fois pour le patient, le dentiste et le prothésiste, ne se fera pas forcément sur le court terme du fait des coûts d'investissement élevés. En effet, l'adoption de l'IA en dentisterie implique des coûts initiaux élevés. Les cliniques dentaires doivent investir dans l'acquisition de technologies d'IA, la formation du personnel et la mise à niveau des infrastructures informatiques. Ces coûts peuvent être prohibitifs pour certains, en particulier les petites structures ou les praticiens indépendants. Les dépenses initiales doivent donc être soigneusement évaluées pour garantir un retour sur investissement viable à long terme.

3.3 L'avenir de la profession : nouveaux métiers, mutations, disparitions ?

3.3.1 Évolution dans la profession de dentiste et nouvelles spécialités

Comme c'est déjà le cas dans plusieurs autres professions médicales, l'arrivée de l'IA en dentaire va probablement entraîner une transformation du rôle du dentiste dans sa pratique. En effet, avec l'IA automatisant certaines tâches, le rôle du dentiste évoluera vers une approche plus centrée sur la communication avec le patient, la prise de décisions stratégiques et la gestion globale du traitement.

L'utilisation de l'IA par les dentistes dans la pratique quotidienne nécessitera cependant un accompagnement notamment pour la formation. De nouveaux métiers seraient donc susceptibles d'apparaître afin d'assurer une transition efficace et aider les dentistes à mieux comprendre les applications possibles.

Des conseillers/experts en intelligence artificielle en dentisterie ayant une expertise approfondie dans le développement et l'application de l'IA en dentisterie pourraient ainsi voir le jour. Les dentistes

devraient ainsi apprendre à communiquer et à collaborer avec ces experts afin de tirer le meilleur parti de la technologie au même titre qu'ils communiquent avec un prothésiste de nos jours.

Il est également possible d'imaginer une spécialisation de certains dentistes dans le domaine avec l'apparition de spécialiste en dentisterie numérique. Ces dentistes se concentreront sur l'utilisation avancée de l'IA et des technologies numériques dans la planification et la réalisation de traitements dentaires complexes. Ils seront responsables de l'analyse des données cliniques et des images radiographiques générées par l'IA, ainsi que de la supervision des systèmes automatisés pour les traitements dentaires.

La collaboration et le partage des connaissances entre praticiens, chercheurs et experts de l'industrie sont essentiels pour stimuler le progrès et assurer une mise en œuvre responsable. L'avenir de l'implantologie réside dans l'exploitation du potentiel de l'IA tout en maintenant les normes les plus élevées de soins aux patients et de pratique éthique (49).

Il est important de noter que ces scénarios sont des perspectives potentielles et que l'impact réel de l'IA sur la profession dentaire dépendra de la manière dont ces technologies seront adoptées et intégrées dans la pratique clinique. Les professionnels de la santé devront s'adapter à ces changements pour rester compétitifs et continuer à offrir des soins de qualité à leurs patients.

3.3.2 Impact sur le métier de prothésiste

L'IA est déjà très utilisée dans les logiciels de conception des morphologies dentaires et présente un certain potentiel dans la réalisation prothétique sur de nombreux aspects. L'entreprise 3Shape a ainsi développé des logiciels de conception qui intègrent des algorithmes d'IA pour optimiser le processus de conception des prothèses dentaires. Cela peut inclure la suggestion de formes de prothèses basées sur la reconnaissance des dents restantes, des modèles anatomiques et des normes esthétiques. L'IA de 3Shape contribue à la personnalisation des prothèses dentaires en prenant en compte les caractéristiques individuelles des patients. Cela permet aux prothésistes dentaires d'offrir des solutions plus adaptées et esthétiquement optimales.

L'arrivée de ces nouvelles perspectives sera inévitablement accompagnée de mutations de plus en plus profondes de la profession de prothésiste au fil du temps. L'arrivée du numérique nous témoigne bien de l'impact qu'ont eu les nouvelles technologies dans le domaine avec de nouvelles compétences

nécessaires, un changement dans les processus de travail, la gestion des données, la rapidité d'exécution ou l'évolution des normes professionnelles.

La question sera donc de savoir dans quelle mesure cette profession évoluera. Actuellement, le métier de prothésiste mêle à la fois travail numérique et manuel. L'automatisation de plus en plus de tâches pourrait donc réduire la charge de travail manuelle, nécessitant une certaine expérience et pouvant varier d'une personne à l'autre, au profit d'une production de qualité constante et en plus grande quantité.

La profession pourrait donc évoluer dans un premier temps vers une activité de gestion exclusivement numérique avec une supervision logicielle et matérielle. A plus long terme, cette supervision pourrait être totalement gérée par une IA et ainsi remplacer progressivement l'humain.

Il est cependant très délicat de prédire avec exactitude l'état d'une profession sur le long terme mais il est évident que, comme le dentiste, le prothésiste dentaire doit se préparer à s'adapter aux changements qui apparaîtront dans les prochaines années afin de ne pas être dépassé par les événements et toujours proposer un travail de meilleure qualité. Cette adaptation jouera également un rôle essentiel dans l'évolution de la concurrence entre laboratoires.

Conclusion

L'IA fait l'objet d'un intérêt croissant dans le domaine médical ces dernières années. Son application en réhabilitation implantaire présente ainsi de belles perspectives avec des résultats plutôt prometteurs. Le nombre actuel d'études reste toutefois encore trop réduit pour démontrer tout son potentiel. Ce nombre augmente cependant très rapidement avec de nouvelles études publiées tous les mois. Il est donc essentiel de noter que les avancées dans le domaine évoluent à une vitesse incroyable nécessitant une actualisation régulière des informations.

Malgré ces résultats optimistes, il reste encore de nombreux obstacles techniques avant de pouvoir rendre ces technologies fiables et généralisables. Les études devraient également recentrer leurs objectifs pour répondre à des problématiques auxquelles nous pouvons attendre un résultat utile dans la pratique sur le court terme. Ces défis s'accompagnent également de plusieurs soucis éthiques qu'il sera indispensable de régler afin de prévenir les dérives.

Il est ainsi encore difficile d'imaginer, même sur le long terme, que l'IA remplacera totalement le chirurgien-dentiste. Il est cependant très délicat de répondre avec certitude à cette interrogation, cela dépendra ainsi des résultats obtenus, des moyens alloués et de la démocratisation des procédés.

Pour finir, il n'est ainsi pas nécessaire, ni objectif, de rejeter l'arrivée de l'IA dans notre profession pour le moment. Bien au contraire, s'informer sur le sujet et se tenir à jour des dernières avancées permettra de mieux appréhender son arrivée au cabinet et pouvoir travailler en coopération avec, sans pour autant en être un simple spectateur dénué de réflexion et d'émotions.

Bibliographie

1. Gottfredson LS. Mainstream science on intelligence : an editorial with 52 signatories, history, and bibliography. *Intelligence*. 1997 ;24(1):13-23.
2. Hansen J. Différences raciales dans l'intelligence. 2018. <https://intelligence-humaine.com/>
3. Gardner H. Multiple intelligences : the theory in practice. New York: Basic Books; 1993. XVI+304.
4. Turing AM. Computing machinery and intelligence. *Mind*. 1950; LIX(236):433-460.
5. Jensen AR. The g factor : the science of mental ability. Westport : Praeger; 1998, XIV-648 p.
6. Kaul V, Enslin S, Gross SA. History of artificial intelligence in medicine. *Gastrointest Endosc*. 2020 ;92(4):807-812.
7. Duval A. L'Intelligence Artificielle Explicable, enjeu majeur pour démystifier les "boîtes noires". 2021. <https://medium.com/ai-for-tomorrow/lintelligence-artificielle-explicable-enjeu-majeur-pour-d%C3%A9mystifier-les-bo%C3%A9tes-noires-e0c2a7c8a036>
8. Kongakura. Réseaux de neurones convolutionnels / réseaux de neurones convolutifs. 2019. <https://kongakura.fr/article/R%C3%A9seaux-de-neurones-convolutionnels>
9. Boussaid I. Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue [Internet] [Thèse de doctorat]. Université Paris-Est ; Université des Sciences et de la Technologie Houari-Boumediène (Alger); 2013 [cité 19 déc 2023]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-00952774>
10. Kulkarni S, Seneviratne N, Baig MS, Khan AHA. Artificial intelligence in medicine : where are we now ? *Acad Radiol*. 2020;27(1):62-70.
11. Briganti G, Le Moine O. Artificial intelligence in medicine : today and tomorrow. *Front Med (Lausanne)*. 2020;7:27.
12. Amisha, Malik P, Pathania M, Rathaur VK. Overview of artificial intelligence in medicine. *J Family Med Prim Care*. 2019;8(7):2328-2331.
13. Fogel AL, Kvedar JC. Artificial intelligence powers digital medicine. *npj Digital Med*. 2018;1(1):1-4.
14. Duron L, Ducarouge A, Gillibert A, et al. Assessment of an AI aid in detection of adult appendicular skeletal fractures by emergency physicians and radiologists: a multicenter cross-sectional diagnostic study. *Radiology*. 2021;300(1):120-129.

15. Partenariat canadien contre le cancer. L'intelligence artificielle dans le traitement du cancer : analyse de l'environnement. 2019. <https://s22457.pcdn.co/wp-content/uploads/2019/09/Artificial-Intelligence-Exec-Summary-FR.pdf>
16. Bruno E, Simblett S, Lang A, et al. Wearable technology in epilepsy : the views of patients, caregivers, and healthcare professionals. *Epilepsy Behav.* 2018;85:141-149.
17. Liu P ran, Lu L, Zhang J yao, Huo T tong, Liu S xiang, Ye Z wei. Application of artificial intelligence in medicine : an overview. *Curr Med Sci.* 2021;41(6):1105-1115.
18. Zhavoronkov A, Ivanenkov YA, Aliper A, et al. Deep learning enables rapid identification of potent DDR1 kinase inhibitors. *Nat Biotechnol.* 2019;37(9):1038-1040.
19. Patel JS, Su C, Tellez M, et al. Developing and testing a prediction model for periodontal disease using machine learning and big electronic dental record data. *Front Artif Intell.* 2022; 5:979525.
20. Pang L, Wang K, Tao Y, Zhi Q, Zhang J, Lin H. A new Model for caries risk prediction in teenagers using a machine learning algorithm based on environmental and genetic factors. *Front Genet.* 2021;12:636867.
21. Lee JH, Kim DH, Jeong SN, Choi SH. Diagnosis and prediction of periodontally compromised teeth using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *J Periodontal Implant Sci.* 2018;48(2):114-123.
22. Alharbi MT, Almutiq MM. Prediction of dental implants using machine learning algorithms. *J Healthc Eng.* 2022;2022:7307675.
23. Lee SJ, Chung D, Asano A, et al. Diagnosis of tooth prognosis using artificial intelligence. *Diagnostics (Basel).* 2022;12(6):1422.
24. Elani HW, Batista AFM, Thomson WM, Kawachi I, Chiavegatto Filho ADP. Predictors of tooth loss: a machine learning approach. *PLoS One.* 2021;16(6):e0252873.
25. Fricain JC, Boisramé-Gastrin S, Chaux-Bodard AG, Cousty S, Devoize L, Lesclous P, et al. Chirurgie orale [Internet]. Editions Espace id; 2019. (Référentiel internet).
26. Liu CH, Lin CJ, Hu YH, You ZH. Predicting the failure of dental implants using supervised learning techniques. *Appl Sci.* 2018;8:698.
27. Regina Casian RV, Hui L. Cone-beam computed tomography (CBCT) applications in dentistry. 2017. Disponible sur: <https://www.dentalcare.com/en-us/ce-courses/ce531>
28. Kurt Bayrakdar S, Orhan K, Bayrakdar IS, et al. A deep learning approach for dental implant planning in cone-beam computed tomography images. *BMC Med Imaging.* 2021;21(1):86.

29. Roongruangsilp P, Khongkhunthian P. The learning curve of artificial intelligence for dental implant treatment planning: a descriptive study. *Appl Sci*. 2021;11:10159.
30. Alsomali M, Alghamdi S, Alotaibi S, et al. Development of a deep learning model for automatic localization of radiographic markers of proposed dental implant site locations. *Saudi Dent J*. 2022;34(3):220-225.
31. Choudhury S, Rana M, Chakraborty A, et al. Design of patient specific basal dental implant using finite element method and artificial neural network technique. *Proc Inst Mech Eng H*. 2022;236(9):1375-1387.
32. Roy S, Dey S, Khutia N, Roy Chowdhury A, Datta S. Design of patient specific dental implant using FE analysis and computational intelligence techniques. *Appl Soft Comput*. 2018;65.
33. Nguyen DS, Park HS, Lee CM. Optimization of selective laser melting process parameters for Ti-6Al-4V alloy manufacturing using deep learning. *J Manuf Process*. 2020;55:230-235.
34. Kazemi M, Ahangarani S, Esmailian M, Shanaghi A. Investigating the corrosion performance of Ti-6Al-4V biomaterial alloy with hydroxyapatite coating by artificial neural network. *Mater Sci Eng B*. 2022 ;278:115644.
35. Noori Banu PS, Devaki Rani S. Artificial neural network based optimization of prerequisite properties for the design of biocompatible titanium alloys. *Comput Mater Sci*. 2018;149:259-266.
36. Bolding SL, Reebye UN. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches. *J Prosthet Dent*. 2022;128(4):639-647.
37. Yang S, Chen J, Li A, Li P, Xu S. Autonomous robotic surgery for immediately loaded implant-supported maxillary full-arch prosthesis : a case report. *J Clin Med*. 2022;11(21):6594.
38. Hadj Saïd M, Le Roux MK, Catherine JH, Lan R. Development of an artificial intelligence model to identify a dental implant from a radiograph. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2020;36(6):1077-1082.
39. Hsiao CY, Bai H, Ling H, Yang J. artificial intelligence in identifying dental implant systems on radiographs. *Int J Periodontics Restorative Dent*. 2023;43(3):363-368.
40. Da Mata Santos RP, Vieira Oliveira Prado HE, Soares Aranha Neto I, et al. Automated identification of dental implants using artificial intelligence. *Int J Oral Maxillofac Implants*. 2021;36(5):918-923.
41. Lerner H, Mouhyi J, Admakin O, Mangano F. Artificial intelligence in fixed implant prosthodontics : a retrospective study of 106 implant-supported monolithic zirconia crowns inserted in the posterior jaws of 90 patients. *BMC Oral Health*. 2020;20(1):80.
42. Lee DW, Kim SY, Jeong SN, Lee JH. Artificial intelligence in fractured dental implant detection and classification: evaluation using dataset from two dental hospitals. *Diagnostics (Basel)*. 2021;11(2):233.

43. Article 4 Du règlement 2016/679 Du parlement européen et du conseil relatif à la protection des personnes physiques à l'égard du traitement des données à caractère personnel et à la libre circulation de ces données ; 2016.
44. Seymour K, Benyahia N, Hérent P, Malhaire C. Exploitation des données pour la recherche et l'intelligence artificielle : enjeux médicaux, éthiques, juridiques, techniques. *Imagerie de la femme*. 2019;29.
45. Ducret M, Mörch C, Richert R, et al. Intelligence artificielle en médecine orale : comprendre les enjeux éthiques et juridiques pour mieux s'y préparer. *Inf Dent*. 2022 (5):48-53.
46. Dilhac MA, Abrassart C, Voarino N. Déclaration de Montréal pour un développement responsable de l'intelligence artificielle. 2018. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/22498/>
47. Mittelstadt B, commandé par le Comité directeur pour les droits de l'Homme dans les domaines de la biomédecine et de la santé (CDBIO). L'impact de l'intelligence artificielle sur les relations médecin-patient. 2021. <https://rm.coe.int/inf-2022-5-report-impact-of-ai-on-doctor-patient-relations-f/1680a6885a>
48. McCarthy J. What is artificial intelligence ? Computer Science Department Stanford University. 2007. Disponible sur: <https://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf>
49. Saeed A, Alkhurays M, AlMutlaqah M, AlAzbah M, Alajlan SA. Future of using robotic and artificial intelligence in implant dentistry. *Cureus*. 2023;15(8):e43209.

Table des figures

- Figure 1 : Hiérarchie des intelligences selon le QI5
- Figure 2 : Le test de Turing7
- Figure 3 : Architecture d'un réseau de neurones profond12
- Figure 4 : Utilisation de la vision par ordinateur sur un véhicule semi-autonome Tesla14
- Figure 5 : Architecture classique d'un réseau de neurones convolutifs15
- Figure 6 : Fonctionnement simplifié d'un algorithme génétique16
- Figure 7 : Répartition des chirurgiens-dentistes en France24
- Figure 8 : Classement des facteurs ayant un impact sur le risque de perte dentaire25
- Figure 9 : Comparaison des valeurs moyennes obtenues par apprentissage (ALL) et celles du gold standard (GS) 29
- Figure 10 : Identification d'un site implantaire potentiel à l'aide d'un CBCT34
- Figure 11 : Rapport de planification pour un cas au maxillaire et à la mandibule à l'aide de l'IA35
- Figure 12 : Identification des marqueurs de GP sur une coupe axiale37
- Figure 13 : Différentes morphologies d'implants38
- Figure 14 : Valeurs optimales de porosité(a), de diamètre(b) et de longueur(c) de l'implant dans des conditions osseuses variables40
- Figure 15 : Principe de fusion de poudre par laser SLM42
- Figure 16 : Valeurs expérimentales comparées aux valeurs de l'ANN (en haut) et du GEP (en bas)46
- Figure 17 : Image virtuelle d'un guide à appui muqueux (gauche) et stabilisé en bouche avec forages réalisés (droite)48
- Figure 18 : Le robot Yomi (A) ; en cours d'intervention (B)49
- Figure 19 : Le robot utilisé pour la chirurgie autonome (en haut) ; en cours d'intervention sans aide humaine (en bas)51
- Figure 20 : Rapport d'identification sur Spotimplant à partir d'une radiographie53
- Figure 21 : Détection automatique de la ligne marginale et conception assistée du pilier (gauche) ; conception assistée de la couronne définitive (droite)55
- Figure 22 : Détection et classification automatique d'une fracture implantaire56

Table des tableaux

Tableau 1 : Facteurs utilisés pour l'étude et leurs états26

Tableau 2 : Critères utilisés dans l'étude pour déterminer le pronostic dentaire28

Tableau 3 : Paramètres de réglages optimaux obtenus par ANN43

Vu, le Directeur de thèse

Vu, le Doyen de l'UFR d'Odontologie

Docteur Hélène CITTERIO

Professeur Vianney DESCROIX

Vu, le Président d'Université Paris Cité

Professeur Édouard KAMINSKI

Pour le Président et par délégation,

Le Doyen Vianney DESCROIX

L'intelligence artificielle en réhabilitation orale implantaire

Hillel Aben Danan. L'intelligence artificielle en réhabilitation orale implantaire. 2024.

73 p.: ill., graph., tabl.. Réf. bibliographiques p. 68-71.

Sous la direction de Mme le Docteur Hélène Citterio.

Université Paris Cité

UFR d'Odontologie

1, rue Maurice Arnoux - 92120 Montrouge

5, rue Garancière - 75006 Paris